Книга содержит популярное изложение основных идей и достижений наиболее загадочной области современной физики — физики элементарных частиц. Исследования в этой области имеют сейчас для науки столь же большое значение, как и исследования атомного ядра 25 лет назад. Именно в физике элементарных частиц могут быть открыты новые явления и закономерности, которые изменят наши представления о Природе и откроют неожиданные возможности для практических применений.

Ю. В. НОВОЖИЛОВ

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ



Ю. В. НОВОЖИЛОВ

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ, ДОПОЛНЕННОЕ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА · 1963 · ЛЕНИНГРАД

Новожилов Юрий Викторович

Элементарные частицы

Л., Физматгиз, 1963 г., 204 стр. с илл.

Редактор *Г. Ф. Друкарев*

Техн. редактор *А. А. Лукьянов* Корректор *Л. А. Любович*

Сдано в набор 6-III 1963 г. Подписано к печати 27-IV 1963 г.
Бумага 84×108[1]/[32]. Физ. печ. л. 6,38. Усл. печ. л. 10,46. Уч.-изд. л 9,82.
Тираж 28000 экз. Т-04950. Цена книги 29 коп. Заказ № 1204.

Государственное издательство физико-математической литературы
Москва, В 17, Ленинский пр., 15

Типография № 2 им. Евг. Соколовой УЦБ и ПП Ленсовнархоза
Ленинград, Измайловский пр., 29.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Физика элементарных частиц занимает особое место среди физических наук. Здесь совершаются открытия, важные не только для понимания мира элементарных частиц, но и для познания общих закономерностей природы. Физика элементарных частиц дает нам подтверждение правильности фундаментальных законов, например таких, как законы сохранения энергии, импульса, заряда и др., и ниспровергает, казалось бы, бесспорные принципы, как это было недавно с законом сохранения четности. Изучая элементарные частицы, мы встречаемся с новыми законами сохранения (например, с законом сохранения барионов). В необычных свойствах гиперонов и K-мезонов, которые мы описываем сейчас с помощью понятия о «странности», несомненно проявляются неизвестные нам закономерности. Ожидается также, что развитие физики элементарных частиц может изменить наши представления о пространстве и времени в малых областях. Все эти обстоятельства вызывают неослабевающий интерес к вопросу об элементарных частицах.

В настоящей книге рассказывается о развитии современной физики элементарных частиц. Предполагается знание физики в объеме средней школы. Математический аппарат в книге не используется. Впрочем, автор не считает, что отсутствие математики значительно упрощает чтение.

Главная трудность при чтении этой книги заключается в том, что многие свойства мира элементарных частиц нельзя выразить с помощью повседневных представлений, так что читатель должен призвать на помощь воображение и терпение, чтобы понять не-

обычные свойства элементарных частиц и привыкнуть к ним.

Физика элементарных частиц шагнула далеко вперед за три года, прошедшие с момента выхода в свет первого издания. Экспериментаторы обнаружили новый класс нестабильных частиц с таким малым временем жизни, что их можно наблюдать только в качестве резонансов при рассеянии других частиц. Далее оказалось, что имеется не одно, а два нейтрино в природе (и, следовательно, два антинейтрино!), отличающиеся по мюонному заряду — величине, ранее неизвестной.

Было достигнуто также некоторое понимание взаимодействий элементарных частиц, чему в значительной степени способствовала работа гигантских синхрофазотронов, предельная энергия которых за этот период возросла в три раза — с 10 до 30 млрд. *эв*.

Однако идеи остались старыми, и по-прежнему мир элементарных частиц еще недоступен для восприятия с единой обобщающей точки зрения. Поэтому в настоящем издании построение книги осталось прежним. В нее добавлен материал, касающийся новых фактов, а также произведены уточнения.

В настоящее время в качестве основной ГОСТом утверждена Международная система единиц. Однако эта система еще не стала привычной для широкого круга читателей. Поэтому все физические величины по-прежнему выражены в абсолютной, или гауссовой системе единиц. Ниже приведены значения основных величин в Международной системе:

Постоянная Планка . . . $h = 6{,}625 \cdot 10^{-34}$ *дж/сек*
Масса электрона . . . . . $m_e = 9{,}108 \cdot 10^{-31}$ *кг*
Заряд электрона . . . . . $e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ *к*
Скорость света . . . . . $c = 2{,}998 \cdot 10^{8}$ *м/сек*

1 *эв* $= 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ *дж*

ВВЕДЕНИЕ

ЧТО ТАКОЕ ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ЧАСТИЦА?

Что будет, если, например, мы возьмем камень и начнем дробить его на все более и более мелкие части? Можно ли делить его беспредельно или существуют какие-то простейшие элементы, «камни мироздания», которые неделимы? Подобные вопросы возникали у людей еще в древности; эти же вопросы в несколько иной форме интересуют ученых и сейчас. В размышлениях над строением вещества возникло понятие об элементарной частице.

Когда мы говорим «элементарная частица», то у многих возникает представление о простейшем бесструктурном элементе, который ведет себя как единое целое всегда и везде. «Всегда и везде как единое целое» — это кажется на первый взгляд непременным условием для элементарной частицы. В действительности такое условие невыполнимо, так как мы никогда не знаем, да и не можем знать *всего* об элементарной частице.

Понятие «элементарная частица» для нас отделяет то, что известно, от того, что мы еще не знаем. Вместо слов «всегда и везде как единое целое» мы говорим об элементарной частице, как о том, что *сегодня* в известных нам явлениях ведет себя как единое целое. Мы понимаем под элементарной частицей ту частицу, структуру которой не знаем.

На различных этапах продвижения «в глубь» вещества элементарными назывались различные частицы. Сначала элементарными считались сравнительно крупные частицы вещества, затем по мере накопления

знаний выяснялась сложность этих частиц, и тогда представление об элементарности переносилось на составляющие их части. Этот путь познания строения вещества, однако, ни в коей мере нельзя мыслить только как продвижение от более крупных элементарных частиц к более мелким. Скорее его можно было бы изобразить как путь через последовательные ступени элементарности. С одной стороны, на каждой ступени элементарности элементарные частицы являются структурными частями тех частиц, которые предполагались элементарными ранее. С другой же стороны (и это главное), на каждой ступени элементарности все элементарные частицы действительно в некотором смысле элементарны — всем им присуще некоторое общее неделимое свойство.

В этом легко убедиться на простых примерах, известных еще из школьного курса физики. Возьмем, например, кусок поваренной соли и будем делить его на все более мелкие и мелкие части. Мы знаем, что эти части будут иметь свойства поваренной соли, если только они содержат по меньшей мере одну молекулу поваренной соли. Молекула — это наименьшая часть вещества, обладающая всеми его химическими свойствами; химические свойства молекул неделимы. В этом смысле молекулу можно назвать простейшей неделимой частицей вещества и считать первой ступенью элементарности. И в то же время молекулы сложны — они состоят из атомов. Если мы разделим молекулу поваренной соли, то получим атом хлора и атом натрия — совсем другие вещества. Свойства поваренной соли исчезают при делении ее молекулы.

Исторически молекулярная теория, в развитие которой внес вклад еще Ломоносов, была первой ступенью в изучении строения вещества. В течение продолжительного времени — в XVIII и в начале XIX века — молекулы считались элементарными частицами. Впрочем, само существование молекул было тогда для ученых только гипотезой.

После молекулярной ступени элементарности следует атомная ступень. Мы знаем, что все вещества в природе—это соединения 102 простейших веществ—

химических элементов. Так, поваренная соль представляет собой соединение элементов натрия и хлора, а вода — это соединение кислорода и водорода. Молекулы всех соединений построены из атомов. Слово «атом» по-гречески означает «неделимый», и это название полностью оправдывается в отношении атома как носителя химических свойств элементов.

Образование молекул из атомов изучает химия. Можно сказать поэтому, что химия — это как бы теория элементарных частиц на атомной ступени элементарности. По законам химии мы можем сразу же установить, например, какие молекулы могут образоваться из атомов кислорода и водорода или же какие соединения может образовывать водород с металлами. Для ответа на эти вопросы не нужно знать строения атомов, достаточно знать только их химические свойства. Но с помощью химических законов мы не можем ответить на вопросы о том, почему водород занимает первую клетку в таблице Менделеева, а кислород находится на восьмом месте, почему натрий — металл, а хлор — не металл. Такие вопросы выходят за рамки химии, так как в основе ее лежит представление об атоме как элементарной частице — химия не изучает строения атома, между тем, как мы знаем теперь, свойства атомов определяются их структурой. Свойства атома водорода или кислорода в химии считаются заданными. Объяснение атомных свойств и таблицы Менделеева было дано лишь тогда, когда физика открыла строение атома.

Исследование атомной структуры — это уже дело современной физики. Составные части атома — электрон, протон, нейтрон — считаются сейчас элементарными. Мы подошли, таким образом, к современной ступени элементарности, которой и посвящена настоящая книга. Электрон, протон и нейтрон были открыты раньше других из известных сейчас элементарных частиц, число которых превышает 30. Электрон знаком ученым еще с конца XIX века. Он был открыт как своего рода атом электричества — опыт показывает, что в природе все заряды по абсолютной величине кратны заряду электрона,

Масса всех электронов составляет ничтожно малую часть массы атома. Но когда говорят о размерах атома, то всегда имеют в виду размеры того пространства, которое занимают движущиеся электроны. В центре атома находится атомное ядро; заряд его по абсолютной величине равен заряду всех электронов атома, поскольку атом в целом нейтрален. В ядре сосредоточена почти вся масса атома.

Некоторое время атомные ядра считались элементарными. Первые сомнения в этом появились после открытия естественной радиоактивности. Окончательно сложность ядер выяснилась в 1919 г., когда английский физик Резерфорд обнаружил, что при бомбардировке ядра альфа-частицами (ядрами гелия) из него можно выбить простейшее ядро — ядро водорода, или протон. После того стало ясно, что лишь протон можно считать элементарным. Затем французские ученые супруги Жолио-Кюри нашли, что при обстреле ядер бериллия появляется нейтральное излучение и что новые лучи могут взаимодействовать с протонами. В начале 1932 г. английский ученый Чадвик показал, что новое излучение состоит из нейтральных частиц с массой, приблизительно равной массе протона. Новые частицы были названы нейтронами. Сразу же после открытия нейтронов независимо друг от друга два физика — советский ученый Д. Д. Иваненко и немецкий ученый Гейзенберг — выдвинули гипотезу, что ядра состоят из протонов и нейтронов. Опыты подтвердили эту гипотезу.

Итак, в начале 1932 г. были уже известны три элементарные частицы: электрон, протон и нейтрон. Эти частицы занимают особое место среди элементарных частиц — они являются строительным материалом для атомов: нейтроны и протоны образуют атомные ядра, ядра и электроны входят в состав атомов. Поскольку же все вещества состоят из атомов, то эти частицы служат как бы первичными кирпичиками вещества. На рис. 1 изображен простейший атом, в котором присутствуют все три основные частицы, — атом тяжелого водорода, или дейтерия. Его ядро состоит из протона и нейтрона, а вокруг ядра движется один электрон.

О свойствах протона, нейтрона и электрона мы расскажем подробно в гл. 1.

1932 г. — год открытия нейтрона — был важной вехой в истории физики элементарных частиц. Этим годом начинается период революционных открытий. Более того, по существу, все новые факты, ставшие достоянием науки в предыдущие годы, относятся равным образом как к атомной физике или ядерной физике, так и к физике элементарных частиц. Лишь после открытия нейтрона были обнаружены факты, изменившие прежние представления об элементарных частицах и заложившие основы современной физики элементарных частиц. Можно сказать, что именно с этого времени начинается современная физика элементарных частиц. Поэтому подробный рассказ в нашей книге начинается также с этого времени (см. гл. 2).

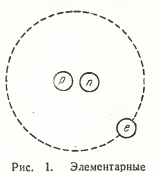


Рис. 1. Элементарные частицы в атоме тяжелого водорода.

p — протон, *n* — нейтрон, *e* — электрон.

После открытия нейтрона вначале казалось, что, наконец, достигнута полная ясность в строении вещества: все известные частицы имели свое назначение, и новых частиц для объяснения явлений как будто не требовалось. Но такое положение сохранялось недолго. Уже в конце 1932 г. был открыт позитрон и обнаружены удивительные превращения электрона и позитрона. В это же время опыты по так называемому бета-распаду атомных ядер как будто бы с неумолимой суровостью сокрушали один из наиболее общих законов природы — закон сохранения энергии. Чтобы спасти положение, теоретиками была предложена гипотеза о существовании еще одной частицы — нейтрино. Многочисленные опыты по исследованию атомного ядра выдвигали вперед важную проблему ядерных сил, необычные свойства которых представляли, казалось, неразрешимую загадку. Затем, с одной стороны, теория

предсказала существование новых частиц, необходимых для объяснения ядерных сил, а с другой — в космических лучах были обнаружены какие-то новые частицы. Иными словами, уже через несколько лет после открытия нейтрона положение в физике элементарных частиц стало весьма запутанным.

В эти же годы произошел также громадный сдвиг в понимании того, что такое элементарная частица. Опыты развеяли полностью старое представление об элементарной частице как о чем-то вечном, неизменном и нерушимом. Оказалось, что элементарные частицы могут рождаться и умирать, превращаясь в другие элементарные частицы. При столкновении одни элементарные частицы могут превращаться в другие, в результате столкновения могут родиться новые частицы. Частицы могут превращаться в излучение — световые кванты, и, наоборот, световые кванты могут порождать частицы. Физики убедились, что взаимопревращаемость присуща элементарным частицам и что нет твердой границы между веществом и излучением. Понятие «элементарная частица» приобрело новый смысл.

Взаимопревращаемость частиц явилась новым наглядным доказательством положения В. И. Ленина о неисчерпаемости свойств электрона и бесконечности природы, которое было высказано им еще в 1909 г. в связи с кризисом в физике.

После открытия взаимопревращаемости элементарных частиц уже нельзя было надеяться, что дальнейшее продвижение по ступеням элементарности будет напоминать переход от молекулярной ступени к атомной или переход от атомной ступени элементарности к современной. Мы не можем предполагать сейчас, что электрон или протон (или другие элементарные частицы) состоят из более мелких частиц. Действительно, в неэлементарности атома легко убедиться, если обстреливать его достаточно быстрыми электронами: если энергия этих электронов больше энергии, связывающей атомный электрон, то можно выбить один из атомных электронов. Аналогичным образом мы можем убедиться в сложности атомного ядра; в этом случае

необходимы только частицы со значительно бо́льшей энергией.

Если же попытаемся таким же путем «раздробить» электрон или протон, то потерпим неудачу. Столкновения элементарных частиц ведут не к дроблению элементарных частиц, а к образованию новых частиц и к их превращениям.

Развитие физики элементарных частиц шло под знаком ее тесной связи с проблемами ядерной физики. В величайшем достижении науки и техники нашего века — практическом использовании атомной энергии — доля успеха принадлежит и физике элементарных частиц.

Благодаря исключительному значению ядерной физики в 1946—1947 гг. в этой области сосредоточились усилия многих ученых. Для изучения элементарных частиц разрабатываются новые точные методы и создаются уникальные установки, среди которых особое место занимают мощные ускорители. В ускорителях можно создавать элементарные частицы искусственно, что необычайно раздвигает возможности эксперимента. Быстрое развитие техники эксперимента в послевоенные годы повлекло за собой много открытий, которые начали новую главу в физике элементарных частиц. Созданная этими открытиями картина далеко не полна сейчас, а многочисленные трудности еще, по-видимому, далеки от разрешения.

На современной ступени элементарности мы насчитываем более 30 частиц, которые признаются элементарными и существование которых доказано. Кроме того, имеется еще несколько частиц, которые предсказаны теоретиками и ждут экспериментального подтверждения. Помимо перечисленных ранее электрона, протона, нейтрона, позитрона и нейтрино, к элементарным частицам относят еще мезоны разных сортов — мю-мезоны, пи-мезоны, K-мезоны, а также многочисленное семейство тяжелых частиц — гиперонов. Все эти частицы образуют вместе мир элементарных частиц, обладающий своими законами и особенностями, которые только отчасти разгаданы. Как мы увидим, многие свойства элементарных частиц отличаются от

свойств обычных тел. Поэтому понятие «элементарная частица» условно не только в том смысле, что их «элементарность» определяется уровнем наших знаний, но и в том смысле, что они не являются частицами в обычном понимании этого слова — подобно биллиардным шарам или мелким камешкам.

Серьезные трудности, встречающиеся сейчас в физике элементарных частиц, это, по существу, намеки природы на закономерности, которые нам еще не удалось открыть. Задача физиков заключается в том, чтобы по этим намекам воссоздать возможно более полную картину действительности. Быть может, среди фактов, с которыми мы встретимся дальше (особенно в гл. 5 и 6), имеются уже те факты, которые впоследствии станут исходными для формулировки новых закономерностей, и изменения некоторых положений, кажущихся сейчас бесспорными.

ГЛАВА 1

НА ПОРОГЕ МИРА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Законы сохранения

Когда физики приступают к изучению какого-нибудь превращения элементарных частиц или когда они хотят узнать, возможно ли интересующее их превращение частиц, то прежде всего они обращаются к законам сохранения.

Законы сохранения — это наиболее общие законы физики; они говорят нам о тех величинах, которые сохраняются при взаимодействии частиц и их превращениях. Число известных нам законов сохранения изменяется с развитием физики. По мере расширения круга явлений, доступных исследованию, отбрасываются некоторые старые законы и формулируются новые законы сохранения. Мы рассмотрим сейчас законы сохранения, касающиеся энергии, импульса и электрического заряда.

Бесчисленные факты убедили нас, что закон сохранения энергии — один из всеобщих законов природы. Этот закон лежит в основе естествознания. Согласно этому закону энергия не может исчезать или рождаться: она может только переходить из одной формы в другую — из механической в тепловую, из тепловой в химическую и т. д.

Нас будет интересовать закон сохранения энергии применительно к столкновениям элементарных частиц.

Для начала напомним, как обычно применяется закон сохранения энергии к столкновениям вообще. Рассмотрим столкновение двух частиц (которые могут

и не быть элементарными). Из закона сохранения энергии мы заключаем, что полная энергия обеих частиц после столкновения должна быть равна полной их энергии до столкновения. Когда нас интересует столкновение частиц, то внешние силы можно не учитывать. Так, если мы исследуем, что происходит при ударе двух камней, то не нужно учитывать сил тяготения, так как потенциальная энергия тяготения практически не изменяется во время удара. В столкновениях элементарных частиц внешние силы также никогда не принимаются во внимание. Если же отбросить внешние силы, то частицы могут двигаться только под влиянием взаимодействия, и, следовательно, полная энергия частиц тогда будет складываться из энергии каждой из частиц в отдельности и энергии их взаимодействия. Сила взаимодействия между частицами всегда убывает с увеличением расстояния между ними. Примером может служить взаимодействие двух электрических зарядов q_1 и q_2. Действующая между ними кулоновская сила обратно пропорциональна квадрату расстояния между зарядами r:

$$F=\frac{q_1 q_2}{r^2}.$$

Энергия взаимодействия также убывает с увеличением расстояния между частицами. Мы можем поэтому всегда найти такое большое расстояние между частицами, на котором энергия их взаимодействия ничтожно мала и общая энергия обеих частиц равна сумме их энергий. Здесь закон сохранения энергии примет простой вид

$$E_1+E_2=E_1'+E_2', \quad (1)$$

если E_1 и E_2 — энергии сталкивающихся частиц *1* и *2* на таких больших расстояниях, когда они еще не взаимодействуют, а E_1' и E_2' — энергия этих же частиц на больших расстояниях после столкновения, когда взаимодействие между ними уже прекратилось. Именно в таком виде и применяется закон сохранения энергии в задаче о столкновениях.

До сих пор мы не уточняли, какое выражение подразумевается для энергии отдельной частицы E.

Рассмотрим случай ньютоновской механики. Если мы, например, рассматриваем столкновение биллиардных шаров, то энергия отдельной частицы E — это кинетическая энергия частицы (потенциальной энергии нет, так как внешние поля отсутствуют!). Для бесструктурной частицы с массой m и скоростью v, по Ньютону:

$$E=\frac{mv^2}{2}.$$

Однако это выражение (как и ньютоновская механика вообще) годится только для движений со скоростями, малыми по сравнению со скоростью света $c=3\cdot10^{10}$ *см/сек*. Между тем элементарные частицы могут двигаться со скоростями, очень близкими к скорости света. Кроме того, как мы увидим ниже, существует еще одна причина того, почему даже при малых скоростях ($v\ll c$) формула $E=\frac{mv^2}{2}$ не может годиться для энергии элементарной частицы. Мы должны воспользоваться теорией относительности Эйнштейна, согласно которой *полная* энергия любой частицы, как простой, так и сложной, есть

$$E=\frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}},$$

если m — масса покоящейся частицы («масса покоя»). Справедливость этой формулы подтверждается самыми разнообразными опытными данными. Она играет фундаментальную роль в современной физике и особенно в физике элементарных частиц. Из этой формулы следует, что и покоящаяся частица (т. е. если $v=0$) обладает энергией, пропорциональной массе m:

$$E_0=mc^2.$$

Эту энергию называют энергией покоя. Как мы увидим в дальнейшем, именно такую энергию нужно затратить, чтобы создать частицу с массой m. При

небольших скоростях (когда $v \ll c$) формула Эйнштейна для энергии E отличается от формулы для кинетической энергии в ньютоновской механике только энергией покоя:

$$E \approx mc^2 + \frac{mv^2}{2}.$$

Формулу для энергии E иногда записывают несколько иначе:

$$E = \overline{m}c^2,$$

$$\overline{m} = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

вводя полную массу тела $\overline{m}$, зависящую от скорости v. Соотношение $E = \overline{m}c^2$ говорит об эквивалентности полной массы $\overline{m}$ и энергии E — эти величины отличаются друг от друга только постоянным множителем c^2. Это соотношение примечательно тем, что оно связывает воедино две величины, которые ранее считались независимыми: масса характеризовала инертные свойства тела, а энергия рассматривалась как мера движения или мера способности совершать работу.

В теории относительности кинетическая энергия равна разности полной энергии и энергии покоя:

$$T = E - mc^2 = mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right).$$

При малых скоростях получаем для T привычную нам формулу

$$T = \frac{mv^2}{2};$$

если же скорость v приближается к скорости света c, то кинетическая энергия T стремится к бесконечности. На рис. 2 представлена зависимость полной энергии от скорости. По оси ординат отложена энергия в единицах энергии покоя mc^2, т. е. отношение E/mc^2. По оси абсцисс отложена скорость в долях скорости света c. Чтобы найти кинетическую энергию в единицах

mc^2, нужно из ординаты вычесть единицу. Любопытной особенностью зависимости энергии от скорости является то, что при скоростях, близких к скорости света, небольшое изменение скорости влечет за собой резкое изменение энергии. Так, когда скорость изменяется от $0{,}85\,c$ до скорости света c, энергия изменяется от $2mc^2$ до бесконечности.

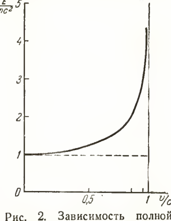


Рис. 2. Зависимость полной энергии частицы E от скорости по теории относительности.

Рассмотрим более подробно формулы Эйнштейна для энергии E. Обратимся для этого к закону сохранения энергии и запишем его, представив энергию E в виде суммы энергии mc^2 и кинетической энергии. Мы по-прежнему имеем в виду столкновение двух частиц 1 и 2, но теперь уже полагаем, что при столкновении частицы могут превращаться, так что после столкновения можем получить иные две частицы. Если m_1 и m_2 — массы сталкивающихся частиц 1 и 2, T_1 и T_2 — величины кинетической энергии до столкновения, а m_1', m_2', T_1', T_2' — массы и кинетические энергии частиц, образовавшихся в результате столкновения, то основной закон (1) дает нам

$$(m_1 + m_2 - m_1' - m_2')\,c^2 = -(T_1 + T_2 - T_1' - T_2'). \quad (2)$$

Согласно этому закону, при столкновении частиц энергия покоя может превратиться (частично или полностью) в кинетическую энергию частиц: например, при столкновении общая кинетическая энергия частиц может увеличиться за счет уменьшения общей энергии покоя. Об этом иногда говорят как о «превращении массы в энергию», что в буквальном смысле неправильно, поскольку, как мы только что видели, в

действительности речь идет о превращении одной части энергии частиц — энергии покоя — в другую ее часть — кинетическую энергию.

Из формулы (2) видно также, почему даже при малых скоростях энергию элементарной частицы нельза писать в виде $\frac{mv^2}{2}$, отбросив массу покоя. Если бы мы так написали, то, согласно закону сохранения (2), это было бы равносильно предположению, что масса частицы не может изменяться.

На первый взгляд может показаться, что взаимопревращения энергии покоя в кинетическую энергию присущи лишь особенным процессам. Но на самом деле мы очень часто наблюдаем и нам хорошо знакомы процессы, в которых изменение кинетической энергии происходит за счет энергии покоя mc^2; только обычно мы описываем их иначе. Мы говорим, например, что при горении угля происходит превращение химической энергии в тепловую (т. е. в кинетическую энергию хаотически движущихся молекул). Между тем, если бы мы попытались точно измерить, с одной стороны, массу угля и кислорода, а с другой — массу продуктов сгорания (включая и газообразные), то обнаружили бы, что при сгорании масса уменьшается на величину

$$\Delta m = \frac{Q}{c^2},$$

где Q — тепловая энергия, выделившаяся при сгорании. Обычно уменьшение массы при сгорании (и в других химических реакциях, сопровождающихся выделением тепла) не регистрируется, поскольку оно очень мало́. При энергии Q, равной одной калории, величина $\frac{Q}{c^2}$ соответствует примерно $5 \cdot 10^{-11}$ *г*. В других обычно наблюдаемых нами процессах изменение массы покоя также настолько мало́, что нецелесообразно описывать эти процессы в терминах изменения массы покоя. Вместо этого обычно сравнивают те части энергии покоя (химическая энергия, тепловая энергия, упругая энергия и т. д.), которые изменяются в результате интересующего нас процесса.

Исключение составляют только ядерные процессы, где изменение массы покоя уже ощутимо.

При столкновениях элементарных частиц, как мы увидим ниже, также возможно превращение энергии покоя в кинетическую энергию. Однако превращения энергии в случае элементарных частиц существенным образом отличаются от только что упомянутых нами превращений энергии в случае горения или химических реакций, ядерных процессов и т. д.

Чтобы убедиться в этом, рассмотрим сначала вопрос: из каких частей складывается масса тела? Если забыть о связи массы и энергии покоя, то этот вопрос может показаться чрезвычайно простым: чему же может быть равна масса сложной частицы, как не сумме масс составляющих ее частей? В действительности масса сложной частицы не равна сумме масс ее частей, так как ее энергия покоя равна разности полной энергии покоя всех ее частей в отдельности и энергии их связи. Энергия связи всегда положительна и равна по величине той энергии, которую нужно приложить к сложной частице, чтобы разделить ее на отдельные части. Так, энергия связи атомного ядра равна по величине той энергии, которая необходима, чтобы разделить ядро на отдельные протоны и нейтроны. Энергия связи атома (точнее, электронов в атоме) определяется энергией, необходимой для того, чтобы полностью ионизовать атом, т. е. лишить его всех электронов. Энергия связи молекулы (ее можно было бы назвать химической энергией) равна по величине энергии, нужной для разделения молекулы на отдельные атомы. Аналогично мы можем говорить об энергии связи молекул в веществе.

Полная энергия, связывающая элементарные частицы в веществе, очевидно, состоит из энергии связи всех ядер $W_я$, энергии связи всех атомов $W_а$, химической энергии $W_х$ и межмолекулярной энергии связи $W_м$:

$$W = W_я + W_а + W_х + W_м.$$

Таким образом, энергия покоя Mc^2 любого тела с массой M есть разность двух величин — суммы

энергий покоя всех составляющих его элементарных частиц (эту часть мы обозначим как M_0c^2) и полной энергии связи W:

$$Mc^2 = M_0c^2 - W.$$

Так как общая энергия связи W положительна, то масса тела M меньше массы всех элементарных частиц M_0 (электронов, протонов и нейтронов), входящих в его состав.

Такое подразделение энергии покоя тела Mc^2 проливает свет на особенности превращения энергии при столкновениях элементарных частиц. В обычных процессах остается постоянной главная часть величины Mc^2 — энергия покоя всех элементарных частиц M_0c^2, а изменяется только энергия связи W. При химических превращениях, например, изменяются $W_{\text{х}}$ и $W_{\text{м}}$, при атомных столкновениях может измениться $W_{\text{а}}$; если мы нагреваем тело, то масса тела увеличивается за счет межмолекулярной энергии связи $W_{\text{м}}$. При этом элементарные частицы, из которых построено тело, остаются неизменными — несколько изменяется лишь их движение. Поэтому-то ранее, до теории относительности, на основе изучения подобных процессов был сформулирован отдельный закон сохранения массы.

В ходе ядерных превращений небольших энергий — например, при освобождении внутриядерной энергии как в результате деления ядер, так и в термоядерных реакциях, — общая масса элементарных частиц почти не меняется; энергия высвобождается здесь за счет внутриядерной энергии связи $W_{\text{я}}$. С этой точки зрения такие ядерные процессы аналогичны горению и другим обычным процессам.

Превращения элементарных частиц отличаются от процессов горения, ядерных процессов и других только что перечисленных процессов тем, что в них *вся* энергия покоя одних частиц может превращаться в кинетическую энергию и энергию покоя других частиц. В результате столкновения двух частиц можно получить три частицы. Частица с бо́льшей массой может распадаться на несколько частиц с меньшей массой. Частицы могут превратиться в электромагнитное из-

лучение — световые кванты, т. е. энергия покоя может полностью превратиться в электромагнитную энергию, и, наоборот, электромагнитное излучение достаточно большой энергии может создавать частицы. С помощью закона сохранения энергии мы можем подсчитывать энергию, освобождающуюся при превращениях частиц; закон сохранения энергии позволяет вычислить энергию, необходимую для образования новых частиц: например, чтобы образовать частицы массы m нужна по меньшей мере энергия mc^2. Можно спросить: почему образование частиц наблюдается столь редко? Дело в том, что для всех элементарных частиц энергия mc^2 велика, и потому вероятность образования частиц оказывается малой. Можно задать также вопрос: почему редки превращения частиц, происходящие с уменьшением массы покоя; ведь в таких процессах как будто бы не нужно затрачивать энергию? Как мы увидим, эти превращения (впрочем, и некоторые процессы с образованием частиц) редки уже не в силу закона сохранения энергии, а вследствие других законов сохранения, а также особенностей взаимодействия частиц.

Следующим важным законом сохранения является закон сохранения импульса. Импульсом, или количеством движения, как известно, в ньютоновской механике называется величина

$$\boldsymbol{p} = m\boldsymbol{v}.$$

Подобно скорости $\boldsymbol{v}$ импульс $\boldsymbol{p}$ — это вектор, т. е. величина, определяемая не только абсолютным значением p, но и направлением. На первый взгляд может показаться нецелесообразным введение новой величины — импульса, которая отличается от скорости лишь множителем (при постоянной массе m). Но импульс — более фундаментальная величина, нежели скорость, так как существует закон сохранения импульса, в то время как отсутствует закон сохранения скорости. В отсутствии внешних сил полный импульс всех частиц постоянен — таково содержание закона сохранения импульса. В качестве примера действия этого закона можно привести отдачу ружья при выстреле. До

выстрела ружье неподвижно; полный импульс равен нулю. После выстрела полный импульс складывается из импульса пули $\boldsymbol{p}$ и импульса отдачи ружья $\boldsymbol{P}'$. По закону сохранения импульса

$$\boldsymbol{P}' = -\boldsymbol{p},$$

т. е. ружье будет двигаться в направлении, противоположном полету пули.

Связь импульса со скоростью $\boldsymbol{p} = m\boldsymbol{v}$ проста только в ньютоновской механике. При больших скоростях это выражение для импульса должно быть заменено другим, вытекающим из теории относительности,

$$\boldsymbol{p} = \frac{m\boldsymbol{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Только при малых скоростях, когда $v \ll c$, импульс будет пропорционален скорости. Когда скорость v приближается к скорости света, импульс p стремится к бесконечности.

В применении к столкновениям элементарных частиц закон сохранения импульса означает, что полный импульс всех частиц до столкновения равен полному импульсу всех частиц после столкновения. Отметим, что в теории относительности импульс и энергия объединены в одну величину — вектор энергии-импульса, а два отдельных закона сохранения — энергии и импульса — объединены в единый закон сохранения энергии-импульса. Из приведенной выше формулы для импульса и выражения для энергии частицы E можно заключить, что энергия E зависит от импульса следующим образом:

$$E = \sqrt{m^2c^4 + c^2p^2}.$$

Именно эта формула для энергии частицы E обычно используется в физике элементарных частиц.

Рассмотрим простейший пример применения законов сохранения энергии и импульса. Предположим, что частица A массы m с импульсом $\boldsymbol{p}$ налетает на покоящуюся частицу $Б$ с массой M. Спрашивается: возможно ли, чтобы частица A была поглощена частицей $Б$,

т. е. чтобы в результате столкновения осталась бы только частица *Б*, а вся энергия частицы *А* (включая и энергию покоя) превратилась бы в кинетическую энергию частицы *Б*? По закону сохранения импульса после превращения импульс частицы *Б* должен быть равен сумме импульсов обеих частиц до превращения, т. е. $\boldsymbol{p}$, и, следовательно, энергия частицы *Б* после столкновения будет

$$\sqrt{M^2c^4+c^2p^2}.$$

Полная энергия до столкновения есть

$$Mc^2+\sqrt{m^2c^4+c^2p^2}$$

— сумма энергии покоя частицы *Б* и энергии частицы *А*. Таким образом, если такое превращение возможно, то законы сохранения энергии и импульса приводят к равенству

$$Mc^2+\sqrt{m^2c^4+c^2p^2}=\sqrt{M^2c^4+c^2p^2}.$$

Возводя в квадрат и сокращая подобные члены, получаем

$$m^2c^4+2Mc^2\sqrt{m^2c^4+c^2p^2}=0.$$

Но это равенство никогда не может быть выполнено, так как левая сторона всегда положительна и не может равняться нулю. Мы пришли к противоречию: это значит, что рассмотренное превращение невозможно — оно противоречит законам сохранения.

Кроме законов сохранения энергии и импульса, хорошо известен также закон сохранения заряда. Современные опытные данные убеждают нас в том, что этот закон также является всеобщим законом природы. Согласно ему, электрический заряд не может рождаться или уничтожаться — во всех явлениях сохраняется алгебраическая сумма зарядов. Отсюда следует, что одна нейтральная частица никогда не может превратиться в одну заряженную, даже если это превращение не противоречит всем остальным законам сохранения.

Число законов сохранения, известное в физике элементарных частиц, не ограничивается рассмотренными

выше законами сохранения энергии, импульса и электрического заряда. В конце этой главы мы встретимся с законом сохранения момента количества движения.

В дальнейшем мы познакомимся с новыми законами сохранения, открытыми при изучении элементарных частиц.

Знакомые частицы и масштабы

В строении вещества фундаментальная роль принадлежит трем элементарным частицам — протону, нейтрону и электрону. Поэтому теперь, когда начальные сведения о ядре и атоме известны даже школьникам, протон, электрон и нейтрон можно назвать знакомыми частицами. На примере этих частиц рассмотрим основные свойства элементарных частиц и одновременно выясним, каков масштаб величин встречающихся в мире элементарных частиц.

Говоря об обычном теле, например о камне, мы прежде всего приводим его массу и размеры; наэлектризованные тела характеризуем еще зарядом. Свойства элементарных частиц можно было бы подразделить на «обычные», т. е. те свойства, которыми обладают и обычные тела, и на «необычные», которые присущи лишь обитателям мира атомов и элементарных частиц. Сейчас мы напомним обычные свойства электрона, протона и нейтрона.

Масса электрона равна примерно $9 \cdot 10^{-28}$ *г*. Такую малую массу невозможно представить себе с помощью привычных нам образов. Можно, конечно, сказать, что тысяча триллионов триллионов электронов будет весить 1 *г*, но вряд ли от этого масштаб массы электрона станет понятнее. Массу электрона принимают за единицу измерения масс элементарных частиц. Поэтому нам больше не придется сталкиваться с абсолютными величинами масс элементарных частиц. Масса протона равна 1836 электронным массам, а масса нейтрона в 1838,5 раза больше массы электрона. Таким образом, протон и нейтрон — тяжелые частицы по сравнению с электроном.

Электрон обладает отрицательным электрическим зарядом. Заряд электрона — это наименьший из существующих в природе зарядов. Опыт показывает, что заряды всех элементарных частиц либо равны (по абсолютной величине) заряду электрона, либо равны нулю. Таким образом, все элементарные частицы несут элементарное количество электричества. Поэтому удобно выбрать в качестве единицы измерения абсолютное значение заряда электрона. Мы будем говорить таким образом, что заряд электрона равен —1. Протон имеет положительный заряд, равный по величине заряду электрона. В наших обозначениях заряд протона равен +1. Нейтрон нейтрален, его заряд равен нулю. Заряды всех сложных частиц обязательно кратны заряду электрона, т. е. в нашей шкале равны целому числу. Заряд электрона равен $4 \cdot 10^{-10}$ единиц CGSE. Это очень малая величина: заряд 10^{19} электронов равен одному кулону.

Итак, как и в случае обычных тел, элементарные частицы имеют массу и заряд, только масштабы этих величин непривычно малы.

Обратимся теперь к вопросу о масштабе длины и размерах элементарных частиц. Рассмотрим сначала размеры атома и ядра. Поперечник атома равен примерно 10^{-8} *см*; иначе говоря, если сто миллионов атомов выстроить в одну цепочку, то ее длина будет равна сантиметру. Но поперечник атома не связан непосредственно с «радиусом» электрона или радиусом ядра. Он определяется, грубо говоря, размером орбиты, по которой движется электрон вокруг ядра. Электроны же движутся на больших расстояниях от ядер, так что ядро занимает ничтожно малый объем по сравнению с объемом атома.

Радиус ядра в десятки тысяч раз меньше радиуса атома. Если бы атом был величиной с Большой театр, то атомное ядро было бы не больше песчинки! Между тем, атомное ядро состоит еще из протонов и нейтронов. Каковы же тогда размеры протона и нейтрона? На первый взгляд кажется, что, поскольку массы протона и нейтрона почти одинаковы, достаточно разделить объем ядра на число протонов и нейтронов в нем,

чтобы получить объем протона или нейтрона. Однако таким путем мы не достигнем цели, ибо найденный объем будет характеризовать не размеры протона или нейтрона, а те силы, которые связывают эти частицы в ядре.

На вопрос о размере элементарной частицы мы не можем сейчас дать исчерпывающего ответа. Чтобы знать размеры элементарной частицы, нужно знать ее структуру: если мы не считаем частицу точкой, то должны сказать, что находится внутри ее, какова ее структура. Первые опыты по исследованию структуры элементарных частиц — опыты по изучению структуры протона — были произведены сравнительно недавно. В этих опытах было установлено, что в некотором смысле протон обладает размерами, определяемыми длиной порядка 10^{-13} *см*. Расстояния порядка 10^{-13} *см* характерны для мира элементарных частиц, и поэтому в качестве единицы измерения в физике элементарных частиц выбирают длину в 10^{-13} *см*, или один ферми (термин принят в честь известного итальянского физика Энрико Ферми).

Каковы же масштабы энергии в физике элементарных частиц? В атомной и ядерной физике энергию обычно измеряют в электрон-вольтах. Один электрон-вольт (*эв*) — это энергия, которую приобретает электрон, пройдя ускоряющую разность потенциала в 1 вольт. 1 *эв* — небольшая энергия: 1 *эв* равен примерно $1{,}6 \cdot 10^{-12}$ *эрг*. Для атома характерной является область малой энергии, исчисляемой десятками, сотнями и тысячами электрон-вольт. Так, например, энергия ионизации атома водорода (т. е. энергия отрыва электрона) равна 13,5 *эв*, а энергия рентгеновских лучей, испускаемых тяжелыми атомами, достигает 100 тыс. *эв*. Ядерные энергии исчисляются миллионами электрон-вольт: средняя энергия связи нейтрона или протона в ядре равна 6—7 млн. *эв*. Общей закономерностью развития физики элементарных частиц является продвижение ее в область все больших и больших значений энергии. Значения энергии, которые вчера считались высокими, сегодня уже считаются малыми. В физике элементарных частиц малой сейчас называют энергию, не превышающую десятка

миллионов электрон-вольт. Область средней энергии простирается до 10^9 *эв*, т. е. до 1 млрд. *эв*. Под высокими пока понимают значения энергии, превосходящие 10^9 *эв*. Наибольшей энергией, достигнутой искусственно, является энергия протонов в 30 млрд. *эв*, ускоряемых в особых ускорителях — синхрофазотронах (см. гл. 6, «Новые ускорители»).

Важными рубежами на энергетической шкале мира элементарных частиц служат энергии покоя различных частиц. С помощью приведенных в этом разделе цифр нетрудно оценить значения энергии покоя электрона и протона. Для электрона находим

$$mc^2 = 9 \cdot 10^{-28}\ г \cdot 9 \cdot 10^{20}\ (см/сек)^2 = 8 \cdot 10^{-7}\ эрг = 0{,}5 \cdot 10^6\ эв.$$

Массы протона и нейтрона почти в 2000 раз больше массы электрона, и, следовательно, их энергия покоя будет равна примерно 10^9 *эв*. Энергия покоя протона, таким образом, отделяет область высокой энергии от области средней энергии. Как мы увидим дальше (в гл. 2), удвоенная энергия покоя электрона, т. е. примерно 10^6 *эв*, также отделяет важную область — только начиная с этой энергии возможно совместное рождение электрона и позитрона.

С какими скоростями движутся элементарные частицы? Прежде всего вспомним, что наибольшей скоростью, абсолютным пределом скоростей всех движений служит скорость света: никакие сигналы, никакие тела не могут обладать скоростью, превышающей скорость света $c = 3 \cdot 10^{10}$ *см/сек*. Со скоростью света распространяются электромагнитные волны; элементарные частицы и другие тела могут иметь скорость, сколь угодно близкую к скорости света, но не совпадающую с ней. Таковы выводы теории относительности Эйнштейна, подтвержденные многочисленными опытами. Тот факт, что не существует движений со скоростями, бо́льшими скорости света, можно считать столь же фундаментальным законом природы, что и закон сохранения энергии.

На первый взгляд может показаться, что в мире элементарных частиц не существует единого масштаба скорости, так как энергия частиц здесь может отличаться в тысячи и миллионы раз. Но в действительности дело обстоит иначе. Выясним, например, в каких пределах будет изменяться скорость электрона, если его энергия увеличивается от 1 млн. до 1 млрд. *эв*? С помощью известного уже нам выражения для кинетической энергии

$$T = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - mc^2$$

легко подсчитать что при кинетической энергии в 10^6 *эв* (т. е. примерно 2 mc^2) скорость электрона составляет уже более 94% от скорости света, а при кинетической энергии в 10^9 *эв* скорость электрона лишь на половину миллионной доли отличается от скорости света. Скорость протона с кинетической энергией в 10^8 *эв* превышает 120 000 *км/сек*, т. е. превышает 40% скорости света, а при кинетической энергии в 10^9 *эв* его скорость равна 85% скорости света.

Иначе говоря, скорости элементарных частиц в десятки тысяч раз превосходят скорость спутников и сравнимы со скоростью света. Поэтому скорость света и выбирают в качестве величины, характеризующей масштаб скоростей в мире элементарных частиц.

И, наконец, о времени. Разумеется, в мире элементарных частиц, где длины измеряются в единицах ферми, а скорость — в долях скорости света, масштаб времени должен существенно отличаться от привычных нам масштабов времени. Мы получим представление о нем, если поделим единицу расстояния (ферми) на скорость света: это даст нам $0{,}3 \cdot 10^{-23}$ *сек*. Временем 10^{-23} *сек* (это время иногда называют ядерным временем) и определяется масштаб времен в мире элементарных частиц. По сравнению с ядерным временем очень велики даже такие ничтожные промежутки, как одна миллиардная доля секунды (10^{-9} *сек*). Интересно также сопоставить это время с характерным атомным временем $2 \cdot 10^{-17}$ *сек*, кото-

рое можно получить, если мы поделим радиус орбиты электрона в атоме водорода $r_0 = 0{,}5 \cdot 10^{-8}$ *см* на скорость электрона на этой орбите $v_0 = 2 \cdot 10^8$ *см/сек*. Таким образом, ядерное время в миллион раз меньше атомного времени.

Фотон

Познакомимся теперь с частицей, которая в некотором отношении занимает особое место в мире элементарных частиц. Эта частица — фотон, или квант света; она обычно обозначается греческой буквой γ (гамма).

Фотоны известны еще с начала XX века, когда было показано, что свет представляет собой поток фотонов. Оказалось, что энергия, переносимая электромагнитной волной частоты ν $\left(\text{длина волны будет } \lambda = \frac{c}{\nu}\right)$, всегда состоит из определенных порций — квантов света, или фотонов с энергией, которая пропорциональна частоте

$$E = h\nu.$$

Множитель пропорциональности h есть постоянная Планка, равная $6{,}62 \cdot 10^{-27}$ *эрг·сек*. Например, желтый свет — это поток фотонов с энергией $h\nu \approx 2$ *эв*, а синий свет состоит из фотонов с энергией $h\nu \approx 3$ *эв*. Электромагнитная волна не может переносить энергию, значение которой выражается через дробное число фотонов; так, значения энергии в $5{,}5\ h\nu$ или $5{,}3\ h\nu$ никогда не встречаются, а значения $5\ h\nu$ или $6\ h\nu$ возможны. Иначе говоря, свет переносит энергию так, как если бы кванты света (фотоны) были частицами. Но этого обстоятельства, разумеется, еще недостаточно для того, чтобы фотоны можно было считать частицами. Если фотоны на самом деле подобны частицам, то для них должны быть справедливы основные соотношения и законы, относящиеся к частицам. Опытные факты показывают, что, действительно, подобно частице

фотон обладает импульсом и что в столкновениях фотона с другими частицами (например, фотона с электроном) законы сохранения энергии и импульса выполняются так же, как и при столкновении двух частиц. Величина импульса фотона p связана с его энергией E соотношением

$$p = \frac{E}{c}.$$

Если, с другой стороны, вспомнить соотношение между энергией E, импульсом p и массой покоя m частиц

$$E = \sqrt{m^2c^4 + c^2p^2},$$

существующее в теории относительности, то легко найти, что масса покоя фотона равна нулю. Итак, фотон обладает свойствами частицы, но в отличие от электрона, протона и нейтрона его масса покоя в точности равна нулю. Все окружающие нас тела построены из частиц, обладающих массой покоя, и потому для того, чтобы представить себе частицу без массы покоя, необходима некоторая доля воображения.

Прежде всего отметим, что с точки зрения ньютоновской механики, в образах которой привыкло мыслить большинство людей, нельзя понять существования частиц с массой, равной нулю. В рамках ньютоновской механики о частице без массы говорить бессмысленно, так как заранее предполагается, что частица обязательно должна иметь массу покоя. С точки же зрения теории относительности Эйнштейна вопрос о массе покоя — это второстепенный вопрос, ибо масса покоя составляет лишь часть полной массы тела

$$\overline{m} = \frac{E}{c^2},$$

определяемой энергией тела E, и фотон также обладает полной массой, равной

$$\overline{m}_{\Phi} = \frac{h\nu}{c^2}.$$

Масса фотона, таким образом, связана целиком с его движением.

Говоря об обычных частицах, мы всегда неявно подразумеваем, что любую частицу можно остановить и наблюдать в состоянии покоя. Это представление неверно по отношению к частице без массы покоя — такую частицу нельзя остановить. Действительно, предположим, что фотон покоится, т. е. его импульс p равен нулю. Тогда из соотношения между энергией и импульсом для случая частицы без массы покоя

$$E = cp$$

заключаем, что и энергия покоящегося фотона равна нулю. Но любой материальный объект должен обладать энергией, и потому покоящегося фотона не существует. Фотон — квант света — всегда движется со скоростью света.

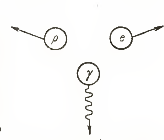


Рис. 3. Излучение фотона γ при столкновении электрона e с протоном p.

Фотоны излучаются и поглощаются атомами и ядрами при переходах из одного состояния в другое (т. е. когда изменяется движение частиц в атоме или в ядре). Ясно, что фотоны не могут существовать внутри атомов и ядер — они создаются заново при излучении. Фотоны могут испускаться при столкновении заряженных частиц, например электрона и протона (рис. 3).

Превращения элементарных частиц записываются в таком же виде, как и химические реакции. Излучение фотона γ в результате столкновения протона p и электрона e можно записать в виде

$$e + p \rightarrow e + p + \gamma,$$

причем стрелка здесь указывает направление реакции.

В течение долгого времени фотоны не причислялись к элементарным частицам. Нейтрон, протон, электрон — элементарные частицы вещества, а фотон — это элементарная порция излучения, квант света. Можно ли их всех объединить под общим названием

«элементарные частицы»?Лишь к 30-м годам XX века физики ответили утвердительно на этот вопрос, убедившись, что во многих отношениях различие между веществом и излучением не столь велико и что у них есть много общих черт.

В самом деле, чем же отличается вещество от излучения? Наиболее сжатый ответ, который первоначально давался на этот вопрос, заключался в двух словах: «Вещество излучает». Когда говорим о веществе в сравнении с излучением, мы имеем в виду, конечно, не просто стол или камень, атом или молекулу, но главные свойства вещества — его инертность, его устойчивость. В противоположность этому, излучение представляется нам чем-то подвижным и изменчивым. Вещество и излучение описывались ранее (до создания теории относительности) в полном соответствии с такими представлениями. Вещество характеризовалось инертной массой, в то время как излучение предполагалось безынерционным — оно характеризовалось только энергией, а его инертная масса полагалась равной нулю. Считалось доказанным, что излучая, вещество не изменяет своего состава — число и тип частиц при этом остаются постоянными; в то же время излучение может возникать — испускаться веществом и исчезать — поглощаться веществом.

Такие представления о веществе и излучении поколебались впервые после появления теории относительности и открытия квантов света. Мы знаем теперь, что излучение, обладая энергией, тем самым обладает и массой, а следовательно, и инертными свойствами. Таким образом, граница между веществом и излучением, связанная с массой и энергией, теперь не столь существенна и сводится к вопросу о массе покоя: вещество состоит из частиц, имеющих массу покоя, а у элементарных частиц излучения — фотонов — массы покоя нет.

Поколебалась со временем и другая резкая грань между веществом и излучением, проводившаяся ранее в связи с другой парой их противоположных свойств — устойчивостью вещества и «изменчивостью» излучения. В 30-х годах был обнаружен новый класс явле-

ний (о них мы будем говорить в гл. 2 и 3), в которых частицы излучения могут превращаться в частицы вещества, и обратно — частицы вещества могут превращаться в частицы излучения. Выяснилось, таким образом, что рождаться и поглощаться могут не только частицы излучения, но и частицы вещества; различны только условия для рождения частиц вещества и фотонов. После открытия взаимопревращаемости вещества и излучения отпали какие-либо основания ставить фотон вне ряда элементарных частиц.

«Охота» за элементарными частицами

Мир элементарных частиц — это мир мельчайших частиц. Как же можно их наблюдать? Как можно отличить одну элементарную частицу от другой? Обычное мелкое тело мы можем увидеть в микроскоп, более мелкие объекты можно рассматривать в электронный микроскоп. Для элементарных частиц микроскопов не существует, элементарную частицу нельзя увидеть. Но тем не менее, мы можем столь же хорошо изучать элементарные частицы, как и любые тела, которые можно увидеть.

«Охоту» на элементарные частицы можно сравнить с охотой на необычного зверя, который никогда не попадается на глаза. Охотник видит только следы зверя и причиняемые им разрушения, но для опытного следопыта этого достаточно, чтобы описать примерный вид, повадки и особенности зверя. Физики также изучают элементарные частицы только по следам, которые они оставляют, по тем разрушениям, которые они производят на своем пути. Они решают задачу воссоздания «облика» частицы по этим данным. Чем больше разрушений производит частица, тем легче ее наблюдать. Чем меньше следов, тем неуловимее оказывается частица. Все свойства элементарных частиц — массу, заряд, превращения и пр. — может установить следопыт-физик по следам. Каждая частица имеет свой собственный след, свою характерную подпись, которые можно отличить от следов других частиц. Следы

частиц — это те сигналы, которые подает о себе людям мир элементарных частиц.

Как же становятся видимыми следы элементарных частиц? В основе методов наблюдения лежит способность заряженных частиц производить ионизацию. Двигаясь через вещество, заряженная частица сталкивается с нейтральными атомами и молекулами и ионизует их, т. е. разбивает их на электроны и ионы. Путь частицы оказывается как бы усеянным осколками атомов и молекул. Ионы можно наблюдать. Для получения и изучения следов, состоящих из ионов, построено много приборов.

Одним из первых приборов, сыгравших важную роль в развитии физики элементарных частиц и ядерной физики, является камера Вильсона. В ней используются свойства насыщенного пара. Известно, что пар долгое время может оставаться пересыщенным, если в нем нет центров конденсации, например пылинок, вокруг которых в первую очередь начинается образование капель жидкости. Ионы могут играть роль центров конденсации: если в пересыщенном паре появится ион, то в следующее же мгновение он окажется в центре маленькой капли. При соответствующем освещении каплю можно сделать видимой.

При своем движении в пересыщенном паре камеры Вильсона элементарная частица создает ионы, на которых тотчас же начинают оседать капельки жидкости. Путь частицы, таким образом, оказывается отмеченным цепочкой капель. Чем больше ионов образует частица, тем больше капель остается на ее пути, тем жирнее след. На одной и той же длине пути медленная частица успевает провзаимодействовать с бо́льшим числом атомов, чем быстрая частица, так что на одном и том же пути медленная частица разбивает больше атомов, чем быстрая. Поэтому след медленной частицы жирнее следа быстрой частицы. На создание каждой пары ионов частица затрачивает определенную энергию, так что по общему числу ионов на траектории частицы можно судить об ее энергии. Чем длиннее след, тем больше первоначальная энергия частицы.

На рис. 4 приведена фотография одной из самых больших в мире камер Вильсона. Ее рабочий объем равен $120 \times 112 \times 50$ *см*^{3}. Через стекло в передней стенке камеры видны металлические пластинки, проходя через которые быстрые частицы тормозятся, теряя энергию при столкновениях с ядрами вещества и на рождение частиц. На микрофотографии рис. 5 есть много следов, начинающихся в пластинках — это следы заряженных частиц (в основном электронов и позитронов), образованных другими частицами в результате реакций внутри пластинок.

Расшифровка следов в камере Вильсона значительно упрощается и становится более полной, если камеру поместить в магнитное поле (впервые этот метод наблюдения был применен акад. Д. В. Скобельцыным). Магнитное поле закручивает траекторию частицы, превращая ее в окружность. Радиус окружности зависит от импульса (количества движения) частицы. Чем больше импульс, тем меньше искривляется путь частицы. Траектории положительных и отрицательных частиц загибаются в разные стороны. Изучение фотографий следов в камере Вильсона дает многое. Измерив радиус кривизны следа, можно найти импульс частицы. По направлению изгиба траектории частицы можно определить знак заряда частицы. Если мы знаем массу, то по импульсу можно вычислить скорость и энергию частицы.

В последнее время стали широко применяться пузырьковые камеры, принцип работы которых очень близок к принципу работы камеры Вильсона. Первая пузырьковая камера появилась в 1952 г. В пузырьковых камерах используются свойства перегретой жидкости. Когда через перегретую жидкость проходит заряженная частица, то именно на созданных ею ионах начинают в первую очередь образовываться пузырьки пара — след частицы оказывается отмеченным цепочкой паровых пузырьков. Поскольку число атомов в жидкости больше, чем в том же объеме газа, то на единицу пути частицы в пузырьковой камере образуется бóльшее число ионов, чем в камере Вильсона. Благодаря этому пути частиц в пузырьковой камере



Рис. 4. Виешний вид большой камеры Вильсона.

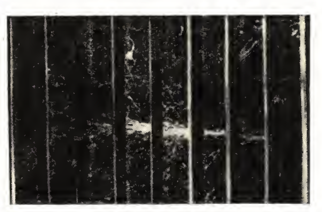


Рис. 5. Следы элементарных частиц в камере Вильсона.

короче, чем в камере Вильсона, и те следы, которые вышли бы за пределы камеры Вильсона, иногда можно проследить в пузырьковой камере. Это расширяет возможности наблюдения.

Помимо паровых пузырьковых камер, известны еще газовые камеры, где след частицы образуется пузырьками газа. В этих камерах используются свойства пересыщенного раствора жидкости и газа. Такие растворы всем известны — примером может служить нарзан или шампанское. Когда открывается бутылка нарзана или шампанского, то жидкость как бы вскипает, потому что вследствие понижения давления выделяются растворенные в ней газы. Аналогично и в газовой пузырьковой камере: при понижении давления в ней начинают появляться пузырьки, причем первые пузырьки образуются на ионах. Методика расшифровки следов в пузырьковых камерах в принципе не отличается от методики изучения следов в камере Вильсона. На рис. 6 представлена фотография следов электронов в пузырьковой камере. На ней можно различить пузырьки, составляющие следы электронов.

Мощным способом изучения элементарных частиц является метод фотографических пластинок. Еще Беккерель более полувека назад обнаружил, что радиоактивное излучение вызывает потемнение фотопластинки. Затем было выяснено, что потемнения такого рода состоят из многочисленных тонких следов, различимых под микроскопом. Для исследования следов заряженных частиц метод фотопластинок был впервые предложен советским физиком Л. В. Мысовским и затем усовершенствован другим советским физиком А. П. Ждановым.

Как же получается фотография следа частицы? В обычном случае, когда на фотоэмульсию падает свет, скрытое изображение возникает в результате того, что кванты света — фотоны — выбивают электроны из атомов бромистого серебра эмульсии. Затем фотопластинка проявляется, и скрытое изображение становится видимым. Но, очевидно, тот же результат можно получить, если заменить свет частицей. Заряженная частица, проходя через фотоэмульсию, будет

выбивать электроны, образуя скрытое изображение. После проявления мы сможем увидеть след частицы — все те места, где ею были выбиты электроны из атомов бромистого серебра. Итак, элементарная частица может сама «фотографировать» свой след.

Для получения следов частиц употребляются специальные пластинки. Они отличаются от обычных фо-



Рис. 6. Следы элементарных частиц в пузырьковой камере.

топластинок бо́льшей толщиной слоя эмульсии и бо́льшим содержанием бромистого серебра в эмульсии. Толщина эмульсии толстослойной фотопластинки может достигать 1 *мм*, что примерно в 100 раз больше толщины эмульсии обычной пластинки. Увеличение доли бромистого серебра делает следы более четкими.

Метод фотоэмульсий имеет ряд преимуществ. Получение следов здесь не связано со сложной аппаратурой или непрерывным наблюдением. Фотопластинки легко доставить на вершину горы, чтобы там подвергнуть действию космических лучей; их также легко

поднять с помощью космических кораблей в космос. Фотопластинки могут экспонироваться днем и ночью, дни, недели, месяц — в зависимости от обстоятельств. При этом, конечно, нужно защищать их от действия света. Следы частиц, попавших в фотоэмульсию, накапливаются, так что одна пластинка может содержать следы многих интересных событий. В последнее время в связи с появлением мощных ускорителей выявилось еще одно достоинство метода фотоэмульсий. Кропотливой стороной этого метода является исследование следов. Длина следов в эмульсии мала, а для определения энергии частицы необходимо тщательное изучение плотности следа, так что измерения следа возможны только с помощью микроскопа, что занимает много времени. Но это обстоятельство легко преодолеть, так как экспонированные пластинки могут исследоваться в любой другой научной лаборатории. Рассылая же экспонированные в ускорителях пластинки в различные города, можно привлечь к работе большое число ученых и тем самым расширить круг изучаемых вопросов.

Что же говорят нам следы в фотоэмульсиях? Следы частиц здесь сохраняют во многом особенности следов в камере Вильсона (разумеется в отсутствии магнитного поля). Медленные частицы дают более жирный след, чем быстрые частицы того же рода. Чем длиннее след частицы, тем больше ее энергия. Однако здесь густота следа измеряется уже не числом капель на единице пути, а числом проявленных зерен бромистого серебра. Чтобы подсчитать энергию частицы, нужно подсчитать число зерен в ее следе от начала до остановки частицы. По характеру следа можно также определить массу частицы. Каждая частица обладает характерным для нее следом. На рис. 7 приведена микрофотография расщепления, вызванного первичной космической частицей с большим зарядом (быстрым атомным ядром с зарядом порядка 30). В результате ее столкновения с ядром эмульсии произошел «взрыв» ядра, причем осколки (протоны и альфа-частица) образовали «звезду».

До сих пор мы говорили только о следах заряженных частиц. Но среди элементарных частиц имеются

и нейтральные частицы, как же можно наблюдать их? Ни в камере Вильсона, ни в пузырьковой камере, ни в фотоэмульсиях нельзя увидеть следов нейтральной частицы, так как она не вызывает ионизацию и потому не оставляет следа. Присутствие нейтральной частицы мы можем, однако, заметить по тем реакциям, которые она производит. Энергию нейтральной частицы можно найти с помощью закона сохранения энергии

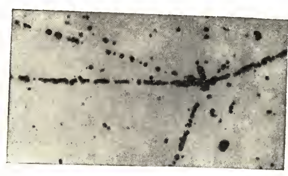


Рис. 7. Микрофотография ядерного расщепления («звезды»), вызванного тяжелой космической частицей в эмульсии фотопластинки.

по энергии заряженных частиц, из закона сохранения импульса можно определить ее импульс и т. д.

Большую и важную группу приборов для регистрации элементарных частиц составляют счетчики. Счетчики не дают следов частиц, они фиксируют лишь факт прохождения частиц. Существуют счетчики различных типов, которые используются в зависимости от наблюдаемого явления. Наибольшее применение находят счетчики Гейгера—Мюллера и сцинтилляционные счетчики. Действие счетчиков Гейгера—Мюллера основано на ионизирующей способности заряженных частиц. Схематически счетчик можно представить в виде трубки, по оси которой расположена тонкая проволока. Между этой проволокой и стенками трубки поддерживается высокое напряжение. Трубка заполнена разреженным газом. При прохождении через трубку заря-

женная частица создает большое число ионов и вызывает разряд между проволокой и стенками трубки. Это сразу же отмечается в виде импульсов тока или напряжения, которые усиливаются и регистрируются. Современные счетчики этого типа способны сосчитать десятки тысяч частиц за одну секунду.

Счетчики подобного типа могут отмечать и нейтральные частицы: имеются счетчики нейтронов и счетчики фотонов. Чтобы, например, сосчитать фотоны, внутреннюю поверхность трубки покрывают светочувствительным материалом. При ударе об эту поверхность фотоны выбивают электроны, которые и регистрирует счетчик. Чтобы обнаружить нейтроны, трубку заполняют газом, в котором нейтрон может легко начать реакцию с появлением заряженной частицы. Эту заряженную частицу и отмечает счетчик.

В сцинтилляционных счетчиках быстрые частицы подсчитываются по вспышкам света (сцинтилляциям), которые вызываются ударами частиц о специальные флуоресцирующие экраны. В первоначальном варианте этого метода вспышки регистрировались глазом экспериментатора; теперь для этого применяются специальные устройства (фотоумножители).

В последнее время широкое распространение получили счетчики скоростей Черенкова. Действие этих приборов основано на интереснейшем явлении, открытом в 1934 г. советским физиком П. А. Черенковым и объясненном в 1937 г. И. Е. Таммом и И. М. Франком. Оказывается, что когда быстрая заряженная частица движется в среде (но не в пустоте!) со скоростью, превышающей скорость света в данной среде (но, конечно, меньшей скорости света в пустоте), то возникает направленное излучение: свет направлен под углом θ к направлению движения частицы (рис. 8). При этом величина угла θ зависит от отношения скорости света в среде v_0 к

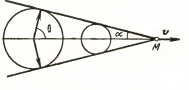


Рис. 8. Эффект Черенкова.

скорости частицы v:

$$\cos\theta = \frac{v_0}{v}.$$

Фронт световой волны имеет вид конуса с углом раствора 2α. Зависимость угла θ от скорости частицы позволяет регистрировать только частицы, обладающие интересующей нас скоростью. Для этого необходимо регистрировать только тот свет, который излучается в направлении, соответствующем заданной скорости частицы.

Счетчики Черенкова принадлежат теперь к числу приборов, без которых не могут обойтись физики-экспериментаторы, занимающиеся исследованиями элементарных частиц на ускорителях. В частности, счетчики Черенкова были использованы при открытии антипротона — одном из крупнейших достижений последних лет (см. гл. 6). За открытие и объяснение явления Черенкова в 1959 г. И. Е. Тамму, П. А. Черенкову и И. М. Франку была присуждена Нобелевская премия.

Особенности мира элементарных частиц

Когда мы начинаем дробить камень, то нам кажется вполне естественным, что, например, законы природы для половины камня те же, что и для целого. Но по мере дробления осколки становятся меньше и меньше, мы доходим до атомов, а затем до элементарных частиц. Возникает вопрос: какие законы управляют миром элементарных частиц? Совпадают ли они с законами для окружающих нас тел?

Все опыты показывают, что мир атомов и элементарных частиц (его называют также микромиром) нельзя представить себе подобным миру окружающих нас тел (мир больших тел называют также макромиром). Элементарные частицы — это не маленькие камешки, и, как уже говорилось, само слово «частица» здесь имеет иной смысл, чем тот, который ему придают, говоря о телах макромира. В микромире господствуют свои собственные закономерности, не похожие на привычные для нас закономерности макромира.

Мы уже знаем, что законы Ньютона неполны в том отношении, что они относятся только к движению тел с малыми скоростями и что для движений с большими скоростями они должны быть заменены законами теории относительности. Но ньютоновская механика (и, разумеется, все области физики, основанные на представлениях ньютоновской механики) неполна и в другом отношении — она описывает правильно только движение массивных тел. В микромире законы Ньютона не годятся; движение атомов и элементарных частиц происходит по законам квантовой механики. Переход от ньютоновской механики к квантовой механике означает не просто замену одних формул другими, но и переход к новым представлениям. В противовес квантовой физике (физике микромира) физику макромира называют классической физикой. Классическая физика является предельным случаем квантовой физики: для больших тел квантовые законы движения автоматически переходят в законы Ньютона.

Квантовые представления оказались настолько новыми и непривычными, что создание квантовой физики было своего рода революцией в естествознании. С точки зрения классической физики нельзя понять ни поведения атомов и элементарных частиц, ни присущих им свойств.

Как показывают опыты, микрочастицы обладают и свойствами частиц классической механики — корпускул и волновыми свойствами. Уже в случае фотона мы фактически встретились с таким положением: с одной стороны, свет — это электромагнитные волны, а с другой — свет представляет собой поток фотонов, обладающих свойствами частиц. Корпускулярно-волновые свойства обнаруживает и электрон. Например, если пучок электронов проходит через кристалл, то на фотографической пластинке за кристаллом можно наблюдать картину, характерную только для волновых процессов. С другой стороны, мы можем измерить координату электрона, что возможно только для частицы. С точки зрения классической механики свойства частиц и волновые свойства взаимно исключают друг друга, в то время как квантовая механика дает

им непринужденное объяснение. Основы квантовой теории были созданы Бором, Гейзенбергом, Шредингером и Дираком.

В нашу задачу не входит рассказ о квантовых закономерностях, и потому мы ограничиваемся пояснением двух важнейших особенностей микромира, без которых нельзя понять многое об элементарных частицах. Эти особенности — дискретность состояний и соотношение неопределенностей.

Строение атома иногда сравнивают со строением солнечной системы. Место Солнца в атоме отводится ядру, а электроны играют роль планет (с той разницей, конечно, что планеты считаются одинаковыми). Эта картина наглядно и хорошо передает относительную роль электронов и ядра в атоме. Попробуем с ее помощью представить, что означает дискретность состояний атома. Солнечная система будет для нас олицетворять классическую физику.

В солнечной системе все планеты движутся по определенным орбитам, начиная от самого близкого к Солнцу Меркурия и кончая наиболее далеким Плутоном. Земля, например, вращается вокруг Солнца на расстоянии примерно 150 000 000 *км*.

Расстояние до Солнца и тип орбиты, по которой движется Земля или другая планета, определились еще во время образования солнечной системы. Если бы условия при создании были несколько иными, чем это было на самом деле, то и расстояния от Солнца и характер орбит планет были бы другими. При подходящих условиях Земля могла бы очутиться и на расстоянии в 160 000 000 *км* от Солнца. Если бы в результате космической катастрофы Солнце сначала лишилось всех планет, а затем планеты вновь попали в сферу солнечного тяготения, то было бы невероятно, чтобы планеты двигались по прежним орбитам.

Совсем иначе обстоит дело с орбитами электронов в атоме. Здесь возможные орбиты совершенно не зависят от предыстории атома, и если бы мы временно удалили из атома все электроны, то затем они вновь разместились бы на прежних орбитах. В случае атома существует единственный набор возможных орбит, ко-

торые могут занимать электроны. Энергия электронов на соседних орбитах отличается на конечную величину, и потому энергия всего атома также меняется прерывно, т. е. образует дискретный спектр.*) Иными словами, уровни энергии атома (или ядра) составляют своего рода лестницу с конечными промежутками между ступеньками. Область энергии между двумя соседними ступеньками является как бы запретной — атом не может обладать энергией из этой области.

Если бы мы провели аналогичное рассуждение для случая солнечной системы, то пришли бы к выводу, что возможная энергия планет меняется непрерывно. В самом деле, если бы слегка изменились условия, бывшие при образовании планет, то изменились бы немного и орбиты, а следовательно, и энергия планет; наряду с существующими значениями энергии планет возможны и другие значения, бесконечно близкие к ним. При непрерывном изменении условий образования солнечной системы возможные энергии планет, вообще говоря, также будут меняться непрерывно.

Среди уровней энергии электронов в атоме можно выделить уровень с наименьшей энергией — основное состояние. Все остальные уровни называются возбужденными. Электрон может находиться в основном состоянии бесконечно долго, не падая на ядро. В этом также заключается отличие от солнечной системы. Наименьшей энергией среди планет обладает Меркурий, находящийся ближе всех планет к Солнцу. Но мы знаем, что Меркурий не будет бесконечно долго вращаться вокруг Солнца; под действием сил трения о межзвездную пыль и других тормозящих сил его

*) В действительности, электронные орбиты не являются орбитами в том же самом смысле, в каком мы употребляем это слово в случае планетных орбит. В связи с соотношением неопределенностей увидим, что нельзя говорить о траектории электрона; под электронной орбитой подразумевают определенное состояние движения электрона в атоме. Понятие об электронных орбитах появилось впервые в планетарной модели атома — на первом этапе изучения атома, когда предполагалось, что строение атома подобно строению солнечной системы.

орбита медленно уменьшается, и когда-нибудь — через многие миллиарды лет — он будет поглощен Солнцем.

Что же произойдет, если электрон в атоме находится в возбужденном состоянии, а основной уровень свободен? В этом случае электрон может перейти с возбужденного уровня энергии на основной, т. е. электрон может совершить «скачок» с одной энергетической ступеньки на другую через запрещенную область энергии. Когда электрон в атоме «перескакивает» с одной ступеньки энергии на другую, то он испускает или поглощает квант света — фотон. Прыжок электрона вниз сопровождается излучением фотона, а переход на ступеньку с бóльшей энергией возможен лишь с поглощением фотона. По закону сохранения энергия фотона всегда равна расстоянию между ступеньками энергии.

Другую важную особенность мира элементарных частиц можно понять качественно с помощью соотношения неопределенностей для координат и импульса. Когда летит снаряд, то мы можем знать одновременно и скорость и местоположение снаряда. Мы можем всегда вычислить также и траекторию снаряда. Иначе говоря, скорость и координаты или импульс (количество движения) и координаты для обычного тела (камень, снаряд, ракета и т. д.) могут быть всегда заданы одновременно. Для элементарных частиц этого сделать нельзя. Одновременное задание импульса (количества движения) и координат в квантовой физике невозможно, а понятие траектории здесь не существует: ведь для определения траектории нужно знать и импульс и координаты элементарной частицы. Если импульс частицы имеет определенное значение, то координата частицы не имеет определенного значения и наоборот. Это значит, что когда, например, импульс элементарной частицы имеет определенное значение, то значения координаты частицы будут различны для различных измерений и можно говорить только о вероятности того или иного результата. Это и выражается соотношением неопределенностей: произведение неопределенности в импульсе Δp на неопределенность в координате Δx не может быть меньше некото-

рой постоянной величины — постоянной Планка $\hbar$;

$$\Delta p \cdot \Delta x \geqslant \hbar.$$

Это соотношение было найдено Гейзенбергом. Согласно этому соотношению, чем точнее определена координата, тем больше неопределенность в импульсе. Соотношение неопределенностей подтверждается всеми известными нам экспериментальными фактами.

Соотношение неопределенностей иногда вызывает недоумение и вопросы. Почему же, например, камню можно приписать одновременно и импульс и координаты, а элементарной частице нельзя? Толкование соотношения неопределенностей выходит за рамки настоящей книги, и потому мы приведем лишь несколько простейших замечаний по этому поводу.

Координатой и импульсом мы характеризуем в классической физике движение обычного тела. Когда же говорим о координате и импульсе элементарной частицы, то тем самым пытаемся описать мир элементарных частиц с помощью классических представлений (т. е. представлений об обычных телах), которые, строго говоря, неприменимы в микромире или же применимы, но с большими оговорками. Предел ограниченной применимости этих представлений к миру элементарных частиц как раз и определяется соотношением неопределенностей. Количественно этот предел связан с постоянной Планка $\hbar$, которая ничтожно мала в масштабе классической физики: $\hbar = 1{,}05 \cdot 10^{-27}$ *эрг · сек*, но играет фундаментальную роль в микромире. Переход от квантовой физики к классической можно представить более наглядно, если от импульса перейти к скорости по формуле $\boldsymbol{p} = m\boldsymbol{v}$ (которая верна только для малых скоростей). Соотношение неопределенностей для координат и скорости, вытекающее из соотношения для координат и импульсов, содержит в правой части массу частицы m:

$$\Delta x \cdot \Delta v \geqslant \frac{\hbar}{m}.$$

Для тела с большой массой неопределенность в координате и скорости не имеет никакого значения ввиду малости постоянной Планка $\hbar$.

Сделаем простой подсчет. Положим, у нас есть тело с массой в 0,1 *г*, скорость которого мы знаем с очень большой точностью — до одной миллионной доли сантиметра в секунду: $\Delta v = 10^{-6}$ *см/сек*. Какова же тогда будет неопределенность в координате тела? Из соотношения неопределенностей следует $\Delta x \approx 10^{-20}$ *см*, т. е. практически координату можно найти точно; соотношение неопределенностей здесь не изменяет привычной для нас картины.

Рассмотрим теперь, что означает соотношение неопределенностей для электрона. При массе в $m \approx \approx 10^{-27}$ *г* соотношение неопределенностей записывается приближенно как $\Delta v \cdot \Delta x \approx 1$ *см²/сек*. Если скорость электрона известна с точностью до одного километра в секунду, т. е. $\Delta v = 10^5$ *см/сек*, то тогда при измерении координаты x неточность будет не менее 10^{-5} *см*. Напомним, что поперечник атома равен примерно 10^{-8} *см*, и на отрезке в 10^{-5} *см*, следовательно, может уместиться тысяча атомов. Только при неопределенности скорости, равной тысяче километров в секунду, неопределенность в координате электрона сравнима с поперечником атома. Эти цифры наглядно показывают, насколько классические представления далеки от действительности в случае микромира.

Когда мы говорили о наблюдении элементарных частиц, то неявно предполагалось, что частицы могут оставлять за собой след, т. е. что они могут иметь видимую траекторию. Это было продемонстрировано и на фотографиях, приведенных на рис. 5, 6 и 7. Как же согласовать эти фотографии с соотношением неопределенностей, из которого следует отсутствие траектории у элементарной частицы? Фотографии следов не противоречат соотношению неопределенностей. Если мы рассмотрим какую-нибудь точку следа, то убедимся, что след определяет местоположение частицы не точно, а лишь в пределах толщины. Это и есть неопределенность в координате частицы. Точно так же и импульс частицы в той же точке известен не точно, а лишь в пределах неопределенности, которая вносится благодаря соударениям с атомами, находившимися

в сечении следа. Произведение обеих неточностей приводит к соотношению неопределенностей.

Помимо соотношения неопределенностей для координаты и импульса, в квантовой физике существует еще соотношение неопределенностей для энергии E и времени t:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geqslant \hbar.$$

Это соотношение истолковывается как возможность отклониться от закона сохранения энергии на величину ΔE на время Δt. Если, например, мы рассматриваем изменение энергии атома при излучении фотона, то энергию фотона будем знать лишь с точностью до

$$\Delta E \sim \frac{\hbar}{\Delta t},$$

если Δt — время, в течение которого атом находится в возбужденном состоянии. Более подробно с примерами действия этого соотношения мы познакомимся в связи с вопросом о взаимодействии (гл. 3) и измерении времени жизни гиперонов по неопределенности в их массах (гл. 5).

То новое и необычное в закономерностях микромира, которое охватывается соотношением неопределенностей, можно отчасти выразить также в нескольких иных словах — с точки зрения того, *как* определяется состояние движения в классической физике, с одной стороны, и в квантовой физике — с другой.

Чтобы исчерпывающим образом охарактеризовать движение снаряда, нам необходимо знать скорость (или импульс) снаряда и его координаты. Согласно же квантовой физике, электрону или другой частице микромира нельзя приписать сразу обе величины — и импульс и координату; если одна из этих величин имеет какое-то определенное значение, то можно говорить только о вероятности того или иного значения другой величины. Таким образом, в квантовой механике состояние частицы определяется иным набором величин, нежели в классической физике. Для квантового описания состояния электрона нам должны быть известны значения не всех тех величин, которыми мы

описываем частицу в классической физике, а лишь их части — той совокупности величин, которые могут быть измерены одновременно.

Какими же величинами, например, будет определяться состояние электрона в хорошо знакомом всем случае — при движении по инерции? Из двух величин — импульса и координаты, которыми описывается движение в классической физике, — мы можем определять состояние электрона только одной величиной, например импульсом. По импульсу легко вычисляется энергия электрона, так что вместо импульса мы можем отмечать состояния свободного электрона по энергии и направлению движения. Но электрон обладает еще особым свойством — спином, которого нет у тел макромира, и потому с помощью одного только импульса нельзя исчерпывающим образом охарактеризовать состояние электрона.

Мы должны теперь познакомиться со спином.

Момент количества движения и спин

Как известно, вращательные движения тел в механике характеризуются с помощью момента количества движения. Если тело движется по окружности — например, если мы вращаем на веревке камень, — то момент количества движения M относительно центра окружности определяется как произведение импульса (количества движения) тела mv на радиус окружности r:

$$M = mvr = pr.$$

Если же тело движется не по окружности — например, если камень сорвался с веревки, — то определение момента количества движения будет несколько сложнее. Мы должны тогда импульс тела $\boldsymbol{p}$ разложить по правилу параллелограмма на две составляющие $\boldsymbol{p}_r$ и $\boldsymbol{p}_t$, где $\boldsymbol{p}_r$ направлено по прямой, соединяющей тело с осью O, а $\boldsymbol{p}_t$ направлено перпендикулярно этой прямой (см. рис. 9).

Из законов движения Ньютона можно вывести, что при взаимодействии частиц полный момент сохраняется. Этот вывод остается в силе и в теории относительности, и в квантовой физике. Таким образом, при столкновении частиц суммарный момент количества движения не меняется. С законом сохранения момента приходится часто встречаться и в повседневной жизни. Мы знаем, что волчок устойчив, когда он вращается, и тотчас же падает, если его остановить. Устойчивость волчка объясняется законом сохранения: вращающийся волчок имеет момент количества движения, и по закону сохранения ось вращения в отсутствии внешних сил должна сохранять неизменное направление. Аналогично, для того, чтобы пуля в полете не кувыркалась, ей сообщают вращение с помощью нарезки в стволе.

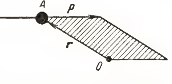


Рис. 9. Момент количества движения тела относительно оси O численно равен площади параллелограмма, построенного на векторах $\boldsymbol{p}$ и $\boldsymbol{r}$.

Рассмотрим теперь особый случай вращательного движения — вращение вокруг собственной оси. Вращение волчка вокруг собственной оси характеризуется моментом количества движения: чем быстрее вращается волчок, тем больше момент; бо́льший волчок при одинаковом числе оборотов в секунду имеет бо́льший момент. Этот момент можно было бы назвать «собственным».

Оказывается, что элементарные частицы также могут обладать собственным моментом количества движения — так называемым спиновым моментом, или спином (слово «спин» означает по-английски «веретено»). Если вспомнить о точечности элементарных частиц, то наличие у них спина может показаться необъяснимым (ведь точка не может вращаться!) и даже вызвать сомнение: не свидетельствует ли спин элементарных частиц об их структуре? Но спин частицы нельзя понимать как ее вращение вокруг какой-то собственной оси. Можно лишь сказать, что

частица со спином ведет себя подобно волчку. Спин — это особое свойство элементарных частиц. Тела макромира (например волчок или автомобиль) не обладают спином. Хотя эти тела и могут вращаться вокруг собственной оси, но такое вращение не является их неотъемлемым свойством; мы можем, в частности, либо усилить их вращение, либо остановить. Спин элементарной частицы нельзя ни увеличить, ни уменьшить.

Если у физика спросить, чем отличается фотон от электрона, то он прежде всего скажет о массе, электрическом заряде и спине этих частиц. Спин — это столь же фундаментальное свойство частицы, что и масса и заряд. Помимо массы и заряда, все частицы подразделяются по спину.

У некоторых частиц, обладающих спином, имеется также и собственный магнитный момент. Такая частица ведет себя как маленький магнит. Если магнитную стрелку поместим в магнитное поле, то она стремится расположиться вдоль линий поля. В компасе стрелка устанавливается в направлении с севера на юг — вдоль линий земного магнитного поля. Подобно этому и частица со спиновым магнитным моментом ориентируется под влиянием магнитного поля. Электрон, протон и нейтрон имеют спиновые магнитные моменты, а у фотона спинового магнитного момента нет.

Величина спина (т. е. спинового момента количества движения) у разных частиц, вообще говоря, может быть различной. Весьма существенно, что возможные значения спина у частиц четко определены в квантовой механике: спин может быть равен только целому или полуцелому числу постоянных Планка $\hbar = \frac{h}{2\pi}$. Поэтому спин измеряют в единицах $\hbar$. Напомним, что у волчка момент количества движения изменяется непрерывно: из-за трения он постепенно теряет скорость вращения и в конце концов падает. Для волчка направление оси вращения, вообще говоря, может быть произвольным.

У частицы со спином ось «вращения» может быть ориентирована только в нескольких определенных на-

правлениях. Это легко выявляется для частицы, обладающей спиновым магнитным моментом, если ее поместить в магнитное поле. Для частицы со спином, равным половине, возможны только две ориентации: либо вдоль поля, либо против поля. У положительно заряженной частицы проекция спина на направление магнитного поля в первом случае равна $^1/_2$, а во втором равна $-^1/_2$ (рис. 10, *а*). Если направление оси z

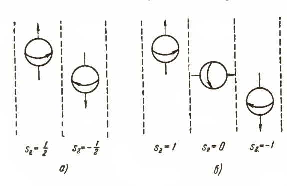


Рис. 10. Частицы со спином $s = \frac{1}{2}$ (*а*) и $s = 1$ (*б*).

Пунктиром показано направление магнитного поля.

совпадает с направлением магнитного поля, то для частицы со спином $s = \frac{1}{2}$ возможны лишь проекции $s_z = \pm\frac{1}{2}$. Для положительной частицы со спином, равным единице, возможны три ориентации оси вращения относительно магнитного поля: либо по полю (проекция $s_z = 1$), либо против поля (проекция $s_z = -1$), либо перпендикулярно полю ($s_z = 0$) (см. рис. 10, *б*).

В отсутствии магнитного поля частицы с различными проекциями спина нельзя отличить друг от друга. Так, частицы с различными проекциями $s_z = +1$, $s_z = 0$, $s_z = -1$ при одинаковой величине спина $s = 1$ ведут себя одинаково, если нет поля.

Элементарные частицы классифицируются по величине спина. Эта классификация важна, так как со спином связано поведение частицы в группе одинаковых частиц, или, как говорят, «статистика» частиц. Существует два типа статистик: Бозе — Эйнштейна и Ферми — Дирака, названные так по именам их создателей — индийского физика Бозе и Эйнштейна, итальянского физика Ферми и английского ученого Дирака. Все частицы с полуцелым спином (известные и неизвестные) подчиняются статистике Ферми — Дирака. Их называют обычно ферми-частицами, или фермионами. Все открытые и неоткрытые еще частицы с целочисленным спином должны подчиняться статистике Бозе — Эйнштейна. Эти частицы называются бозе-частицами, или бозонами. Протон, нейтрон и электрон имеют спин $s = \frac{1}{2}$ и, следовательно, являются фермионами. Спин фотона равен единице, т. е. фотоны — это бозоны.

Чем же отличается поведение фермионов от поведения бозонов? Для фермионов характерно то, что в одном и том же состоянии не может находиться более одной частицы. Для бозонов же число частиц в одном состоянии может быть произвольным. Итак, фермионы как бы стремятся к обособленности, а бозоны, наоборот, могут быть вместе.

Когда говорят, что два электрона не могут находиться в одном и том же состоянии, то это значит, в случае свободных электронов, что никогда не бывает такого положения, когда два свободных электрона имеют одинаковые импульсы и одинаковые проекции спина. Одним и тем же импульсом могут обладать только два электрона с разными проекциями спина: если у одного электрона $s_z = +\frac{1}{2}$, то у другого $s_z = -\frac{1}{2}$. У некоторых читателей может возникнуть вопрос: если с одним и тем же импульсом могут двигаться только два электрона, то как же тогда получают в экспериментах мощные потоки электронов с одинаковыми скоростями? Это кажу-

щееся противоречие объясняется просто. В электронном потоке скорости электронов не совпадают точно, а распределены в небольшом интервале как по величине, так и по направлению. Между тем достаточно электрону иметь скорость, очень близкую (но не равную в точности!) к скорости второго электрона, чтобы состояния обоих электронов были различными.

Таблица 1

Свойства первых частиц

Частица	Символ	Масса покоя	Спин	Заряд
Фотон	γ	0	1	0
Электрон . . .	e	1	$\frac{1}{2}$	-1
Протон	p	1836,1	$\frac{1}{2}$	$+1$
Нейтрон	n	1838,6	$\frac{1}{2}$	0

Итак, мы познакомились с первыми элементарными частицами — электроном, протоном, нейтроном и фотоном, и с основными особенностями мира элементарных частиц. Свойства первых частиц объединены в табл. 1.

ГЛАВА 2

ПЕРВЫЕ ШАГИ В МИРЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Переход к новым квантовым представлениям о частицах микромира не повлиял существенно на тот смысл, в котором понималась элементарность частиц. По-прежнему преполагалось, что неизменность — это одна из характерных черт, связанных с элементарностью частицы. Первые же шаги ученых в изучении мира элементарных частиц привели к полному крушению такой точки зрения. Удар по старым представлениям об элементарных частицах был нанесен открытием позитрона и превращений электрона и позитрона.

Открытие позитрона

Еще в начале XX века Гесс обнаружил, что из межпланетного пространства на Землю приходят лучи. В дальнейшем было установлено, что эти космические лучи состоят из заряженных частиц и что в них встречаются частицы с очень высокой энергией. С конца 20-х годов началось интенсивное изучение космических лучей. Физиков интересовал состав лучей, их происхождение, энергия космических частиц. Одним из полезнейших приборов в наблюдении за лучами была камера Вильсона. Особенно много сведений с ее помощью стали получать, помещая камеру в сильное магнитное поле, изгибавшее путь частицы в зависимости от ее заряда и энергии. Вначале казалось, что космические лучи состоят только из прото-

нов и электронов. Правда, среди космических частиц иногда попадались частицы столь высокой энергии, что они проходили через магнитное поле, не отклоняясь. Природу такой частицы нельзя было установить.

Но вот в 1932 г. американский физик Карл Андерсон среди следов космических частиц в камере Вильсона обнаружил непонятный след. Этот след в магнитном поле закручивался в иную сторону, нежели след электрона. Можно было дать два объяснения: либо след принадлежал положительно заряженной частице, либо след принадлежал электрону, который двигался в обратном направлении, т. е. не сверху вниз, как движутся космические частицы, а снизу вверх. Сомнения были устранены следующим опытом. В камеру Вильсона была помещена горизонтально свинцовая пластинка. Проходя через пластинку, космическая частица теряла часть своей энергии, так что легко было определить, в каком направлении она движется. Андерсону удалось сфотографировать космическую частицу, которая двигалась сверху и отклонялась магнитным полем в другую сторону, чем электрон. Это могла быть только положительная частица. Но это не мог быть протон — след частицы был во много раз длиннее столь же закрученного следа протона (рис. 11). Андерсон предположил, что неизвестная частица имеет ту же массу, что и электрон, и положительный заряд, и назвал частицу позитроном. К тому же результату пришли в следующем году Блеккет и Оккиалини, которые усовершенствовали экспериментальную методику Андерсона и смогли получить несколько снимков новой частицы.

Открытие позитрона вызвало большой интерес у физиков. Ученые стали искать позитроны не только в космических лучах, но и в процессах с участием радиоактивных ядер. Вскоре выяснилось, что позитроны могут рождаться и умирать. Супруги Жолио-Кюри, Блеккет и Оккиалини и другие ученые показали, что позитроны могут образовываться под действием гамма-лучей. Замечательным обстоятельством было то, что позитроны рождались всегда вместе с электронами. При этом гамма-лучи не всех радиоак-

тивных веществ оказывались эффективными. Например, гамма-излучение тория C″ с энергией 2,6 млн. *эв* производит позитроны при попадании на свинцовый экран, а гамма-лучи полония с энергией 0,8 млн. *эв*

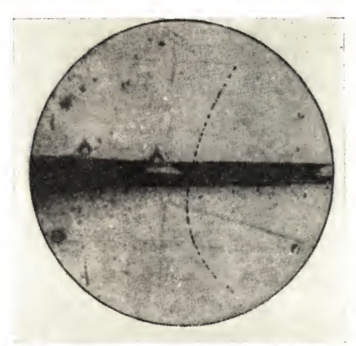


Рис. 11. След позитрона в камере Вильсона.

не дают ожидаемых эффектов. Лишь гамма-лучи с энергией свыше 1 млн. *эв* оказались способными к рождению позитронов.

Образование позитрона и электрона гамма-квантом можно видеть на фотографии, приведенной на рис. 12. Невидимый фотон порождает в пластинке посредине камеры Вильсона пару частиц (электрон и позитрон), образующих характерную «вилку». Траектории электрона и позитрона изогнуты в разные сто-

роны, поскольку их заряды имеют противоположные знаки. Эта фотография примечательна: глядя на нее, мы воочию убеждаемся в возможности превращения света в вещество.



Рис. 12. Образование пары электрон — позитрон в камере Вильсона.

В дальнейшем были подробно изучены самые разнообразные способы возникновения пар электронов и позитронов: под действием быстрых электронов, под действием протонов или альфа-частиц, при столкновении двух электронов и другими путями. Во всех этих экспериментах электроны вели себя совсем не как «вечные и неразрушимые» частицы, хотя ученые и были убеждены в их элементарности.

Итак, мы познакомились в общих чертах с рождением пары электрон — позитрон. Последующие опыты

выявили, что существуют и другие превращения электрона и позитрона. О том, какие превращения возможны, а какие не могут происходить, мы можем судить с помощью законов сохранения. Попытаемся же использовать их теперь для решения вопроса, как рождаются и исчезают позитроны?

По закону сохранения заряда общий заряд не может изменяться. Поэтому нейтральные фотоны могут превратиться только в частицы, общий заряд которых тоже равен нулю. В нашем случае это выполняется: фотоны рождают электроны и позитроны всегда парами. Закон сохранения энергии говорит нам о той энергии, которая необходима для создания частиц. Наименьшая энергия будет затрачена в том случае, когда образуются покоящиеся частицы. Энергия покоящихся электрона и позитрона равна $2Mc^2$, или примерно 1 млн. *эв*. Вот почему только гамма-лучи с большей энергией способны производить позитроны. Если энергия фотонов велика, то часть энергии идет на образование самих частиц (эта часть равна $2Mc^2$), а остальная часть предстает перед нами в виде кинетической энергии электрона и позитрона. Например, если энергия гамма-кванта равна 1,2 млн. *эв* (гамма-лучи радия С), то кинетическая энергия разлетающихся позитрона и электрона равна приблизительно 0,2 млн. *эв*.

До сих пор мы ничего не говорили о том, сколько фотонов нужно для образования пары электрон — позитрон. Может ли, например, один фотон создать пару или для этого требуется обязательно два фотона? Из закона сохранения энергии мы можем заключить лишь об энергии, нужной для рождения пары; этой энергией, казалось бы, мог обладать и один фотон. Однако если принять во внимание еще закон сохранения импульса, то оказывается, что один фотон может создать пару не всегда, а только при определенных условиях.

Рассмотрим наиболее удобный для подсчетов случай, когда в образовавшейся паре электрон и позитрон разлетаются в противоположные стороны с одинаковыми скоростями, т. е. когда $p_+ = -p_-$ (p_- — им-

пульс электрона, а p_+ — импульс позитрона). По закону сохранения импульса полный импульс пары должен быть равен импульсу фотона p. Но в нашем случае $p_+ + p_- = 0$, между тем как импульс фотона $p = \frac{h\nu}{c}$ не может быть равен нулю, так как энергия фотона $h\nu$ должна быть больше $2mc^2$. Отсюда выводим, что один фотон не может образовать пару.

Однако этот вывод верен не всегда. Ранее мы предполагали, что *весь* импульс фотона передается родившейся паре. В действительности может быть иначе. Если вблизи находится ядро, то оно может забрать импульс фотона, в то время как энергия фотона распределится — часть энергии пойдет на образование пары, а другая часть сообщится ядру. Иными словами, если один фотон образует пару рядом с ядром, то ядро испытывает отдачу, и законы сохранения выполняются. По этой причине фотоны могут легко образовывать пары при прохождении через вещество. Фотография на рис. 12 как раз запечатлела пару, образованную фотоном в поле атомного ядра свинца.

Два фотона могут создать пару.

Позитрон обычно обозначается символом e^+, а для электрона отныне будем пользоваться обозначением e^-. Превращение двух фотонов в пару e^+ и e^- можно записать в наглядной форме:

$$2\gamma \rightarrow e^+ + e^-.$$

В квантовой физике известен важный принцип обратимости процессов микромира. Он гласит, что если существует какой-то прямой процесс (например превращение одних частиц в другие), то обязательно должен существовать и обратный процесс. Иными словами, в уравнении для реакции с элементарными частицами стрелка может быть направлена в обе стороны. Наряду с образованием пары электрон — позитрон должен происходить и обратный процесс —

превращение пары электрон — позитрон в два фотона:

$$e^+ + e^- \to 2\gamma.$$

Превращение пары в фотоны называют аннигиляцией пары, что означает «уничтожение» пары. Это название несколько неудачно, так как при поверхностном знакомстве с предметом у неспециалиста может создаться впечатление, что речь идет о превращении пары в ничто. Энергия фотонов, образующихся при аннигиляции, равна энергии электрона и позитрона, т. е. во всяком случае она должна быть не меньше энергии покоя пары $2Mc^2$. Обычно пара электрон — позитрон кончает свое существование, когда частицы движутся медленно, и их импульс близок к нулю. По закону сохранения будет близок к нулю и импульс аннигиляционных фотонов — фотоны разлетаются в противоположные стороны, унося с собой по половине общей энергии, т. е. примерно по Mc^2. Такие аннигиляционные гамма-лучи, действительно, наблюдаются.

Открытие позитрона было исключительно важным событием.

«Свет не может превратиться в вещество» — таково было общее мнение до открытия позитрона. Рождение пар фотонами и превращение пар в фотоны стали доказательством того, что многие свойства вещества и излучения мы должны поставить в один ряд и что в некоторых отношениях отличие между ними носит скорее количественный, нежели качественный характер. Масса покоя элементарной частицы излучения фотона равна нулю, а масса покоя элементарных частиц вещества отлична от нуля; спин фотона равен единице, а спины электрона и протона равны половине — вот в чем главные отличия фотона от других элементарных частиц.

Превращения позитрона заставили по-новому взглянуть на вопрос «что такое элементарная частица». Теперь представление об элементарной частице перестало иметь что-либо общее с наивными

представлениями об «извечном и неизменном строительном элементе Вселенной». На смену пришла взаимопревращаемость частиц.

Частицы и античастицы

По существу позитрон был предсказан теорией еще до первых опытов Андерсона. Из теории электрона Дирака, развитой еще до открытия позитрона, вытекало, что наряду с электроном должна существовать частица с той же массой, что и у электрона, но с другим знаком электрического заряда. Теория Дирака предсказывала и удивительные превращения электрона и позитрона. Но путь, которым Дирак пришел к своей теории позитрона, был весьма необычен, и у экспериментаторов не было доверия к ней. Кроме того, в то время физики еще не привыкли к тому, что теория может предсказывать элементарные частицы. Позитрон был первой частицей, существование которой следовало из теории.

Еще в 1928 г. Поль Дирак предложил уравнение, описывающее электрон. Это уравнение должно было для электрона играть ту же роль, что и ньютоновские уравнения движения для тел макромира. При построении своего уравнения Дирак опирался на самые общие принципы теории относительности и квантовой теории. Только две экспериментальные величины были введены в уравнение Дирака — заряд и масса электрона. Между тем из уравнения Дирака автоматически получались и спин электрона и уровни энергии в атоме водорода, причем согласие с опытом было превосходным. Это был большой успех, заставивший поверить в правильность нового уравнения для электрона.

Однако тут же выявились странные особенности уравнения Дирака. Оказалось, что уравнение Дирака имеет решения как с положительной, так и с отрицательной энергией. Но мы знаем, что энергия, как и масса, может быть только положительной величиной, и потому только решениям с положительной энергией

можно было придать смысл, сопоставив их электрону: ведь частица не может иметь отрицательную энергию. Было предпринято много попыток избавиться от отрицательной энергии, но все они были безуспешными. Отбрасывание отрицательной энергии делало теорию внутренне противоречивой, и ее результаты тогда противоречили опыту. Получалось так, что теория, прекрасно согласующаяся с экспериментом, содержала в себе бессмысленные величины — отрицательную энергию.

Дирак нашел выход из положения. Путем остроумных рассуждений он показал, что состояния электрона с отрицательной энергией должны на самом деле описывать позитрон. Позитрон трактовался Дираком как «дырка» среди распределения электронов с отрицательной энергией, что, разумеется, многим казалось парадоксальным. В дальнейшем все выводы теории позитрона Дирака были получены из иных соображений.

Еще до открытия позитрона ученых удивляло неодинаковое положение положительных и отрицательных зарядов в природе. Почему атомные ядра содержат тяжелые положительные частицы — протоны, а отрицательных частиц с такой же массой нет? Почему есть легкая частица с отрицательным зарядом — электрон, но нет столь же легкой частицы с положительным зарядом? Асимметрия природы относительно знака заряда казалась необъяснимой. Открытие позитрона уменьшило асимметрию и подало надежду, что в действительности законы природы симметричны относительно знака заряда, а наблюдающаяся асимметрия атома объясняется какими-то случайными причинами. Возможное решение проблемы было дано теорией. Выяснилось, что все результаты теории Дирака можно вывести из требования зарядовой симметрии законов природы. Скажем более точно, физики-теоретики постулировали, что законы природы инвариантны относительно зарядового сопряжения.

В чем же состоит принцип зарядового сопряжения?

Упрощенно зарядовое сопряжение можно понимать как симметрию по знаку заряда, так как, согласно этому принципу, каждая заряженная частица должна иметь античастицу, отличающуюся от самой частицы знаком заряда. Так, античастицей по отношению к электрону является позитрон. Но принцип зарядового сопряжения шире зарядовой симметрии — он относится не только к заряженным, а ко всем элементарным частицам. Наряду с любой частицей, в том числе и нейтральной, должна существовать античастица. Это значит, что из одного факта существования протона, нейтрона и фотона вытекает существование антипротона, антинейтрона и антифотона. Правда, антифотон по своим свойствам совпадает с фотоном; фотон и антифотон — это одна и та же частица. Принцип зарядового сопряжения гласит, что законы природы не меняются, если все частицы заменить античастицами. Иными словами, те же законы, которые управляют жизнью атомов, будут также управлять и жизнью антиатомов, построенных из антипротонов, антинейтронов и позитронов.

Таким образом, открытие позитрона предвещало новые открытия. Та же теория, которая заранее описала свойства позитрона, предсказывала новые частицы — антипротон, антинейтрон, а также античастицы к любым частицам, которые могут быть открыты в будущем. И эти предсказания заслуживали полного доверия, так как правильность основного принципа была наглядно продемонстрирована не только на примере позитрона, но и на примере многих явлений, которые объяснялись с помощью уравнения Дирака. Свойства античастиц при этом определялись вполне точно: масса античастицы равна массе частицы, спины частицы и античастицы также совпадают, а заряд античастицы противоположен по знаку заряду частицы. Спиновый магнитный момент античастицы имеет знак, противоположный знаку магнитного момента частицы. Превращения частиц и античастиц должны во многом напоминать превращения электрона и позитрона.

Так, антипротон должен иметь массу протона и отрицательный заряд. У нейтрона нет заряда, и антинейтрон будет также нейтральной частицей; но антинейтрон и нейтрон должны быть разными частицами. Некоторые превращения, в которых участвует нейтрон, будут невозможными для антинейтрона. Магнитный момент антинейтрона должен иметь знак, противоположный знаку магнитного момента нейтрона.

Для рождения пары протон — антипротон или нейтрон — антинейтрон нужна очень большая энергия. Масса покоя протона и нейтрона почти в две тысячи раз превышает массу электрона, а это значит, что и энергия для создания протон — антипротонной пары должна быть в несколько тысяч раз больше энергии, затрачиваемой на электронно-позитронную пару. Миллиардами электрон-вольт исчисляются энергии, необходимые для рождения пары тяжелых частиц. Такая гигантская энергия встречается у космических частиц. В лабораторных условиях частицы с миллиардной энергией удалось получить только в 1953 г. Поэтому лишь в 1955 г. группа американских физиков обнаружила антипротоны среди других частиц, создаваемых протонами с энергией в 6,2 млрд. *эв* в ускорителе Калифорнийского университета — беватроне. Через некоторое время было подтверждено существование антинейтрона.

Итак, в результате открытия позитрона наши представления о свойствах симметрии природы пополнились зарядовым сопряжением. Существенное дополнение к представлению об античастицах внесли опыты, в которых было обнаружено несохранение четности (см. гл. 6).

Сохранение энергии или новая частица?

Следующая элементарная частица, которую узнали физики, — нейтрино — также была предсказана теорией. Но, в отличие от позитрона, эта частица не была найдена тогда же; только через 20 лет после предска-

зания теоретиков появились убедительные прямые доказательства ее существования. Однако уверенность в реальности существования нейтрино не покидала физиков, так как самая основа естествознания — закон сохранения энергии — была бы потрясена, если бы не было нейтрино. Эта уверенность поддерживалась еще и тем, что хотя нейтрино нельзя было «увидеть», но его присутствие ощущалось во многих опытах.

Еще в начале XX века было установлено, что атомные ядра могут распадаться с испусканием электронов. Такой распад ядер называется бета-распадом. При бета-распаде ядро выбрасывает отрицательный электрон и превращается в ядро, заряд которого на единицу больше заряда первоначального ядра. Так как масса электрона ничтожна по сравнению с массой ядра, то при бета-распаде массовое число не изменяется. Например, ядро калия (массовое число 40, атомный номер 19) при бета-распаде превращается в ядро кальция с номером 20 (массовое число 40):

$$K_{19}^{40} \to Ca_{20}^{40} + e^-.$$

О чем же говорит распад ядра с появлением электронов? На первый взгляд это значит, что в ядре имеются электроны. Но это оказалось не так. Простые квантовые рассуждения решительно отбрасывают даже мысль о том, что внутри ядра могут содержаться электроны. Вспомним прежде всего, что размеры ядра очень малы даже по сравнению с размерами атома — они исчисляются расстояниями порядка $r_0 \sim 10^{-13}$ *см.* Что же будет, если мы попытаемся заключить электрон в область с такими размерами? Из соотношения неопределенностей для координат и импульсов $\Delta p \cdot \Delta x \geqslant \hbar$ находим, что если неопределенность координаты электрона есть $\Delta x \sim r_0$, то импульс электрона должен быть не меньше, чем $\Delta p \sim \frac{\hbar}{r_0}$. Этому импульсу соответствует кинетическая энергия электрона порядка сотни миллионов электрон-вольт. Но электрон с такой энергией не может находиться в ядре, поскольку энергия связи в ядрах значительно меньше сотни миллионов электрон-вольт,

Иначе говоря, электроны не могут быть в ядрах, так как ядра очень малы.

Откуда же берутся электроны при бета-распаде ядер, если в ядрах нет электронов? Аналогичное положение нам известно в случае атома. В атоме нет фотонов, хотя атом излучает и поглощает фотоны. Фотоны рождаются при переходе атома с одного уровня энергии на другой, более низкий уровень. Это не вызывало удивления, так как фотоны — частицы света, а мы знаем, что свет не содержится внутри атома. Точно так же и при бета-распаде электронов нет в ядре, они создаются вновь при превращении ядра. Если считать, что электрон и фотон — вполне равноправные частицы, то такое сходство в их поведении не может вызвать удивления.

Опытное изучение бета-распада выявило серьезные трудности в истолковании этого явления. Экспериментальные факты, казалось, были в явном противоречии с двумя законами сохранения — энергии и момента количества движения. Трудность заключалась в следующем. Как мы уже говорили, испускание электронов ядром при бета-распаде аналогично испусканию света атомами. Атомы излучают фотоны при скачке из одного уровня энергии на другой, и поэтому энергия фотонов имеет всегда определенные значения. Спектр излучаемых фотонов дискретен и соответствует уровням энергии атома. Следовало ожидать, что и энергия электронов, испускаемых ядром при переходе с одной «ступеньки» энергии на другую, тоже будет вполне определенной и равной «высоте» ступеньки. Но из опытов следовало, что энергия электронов бета-распада не имеет одного определенного значения. Получалось так, как если бы электрон, вылетая из ядра, уносил с собой только часть энергии, причем эта часть энергии может быть различна в разных опытах.

До сих пор неявно предполагалось, что все четыре известные нам частицы устойчивы. Но оказывается, что устойчивы лишь протон, фотон и электрон; поведение же нейтрона зависит от того, свободен ли он или находится в ядре. Будучи связан в ядре, нейтрон может быть устойчив, а в свободном состоянии ней-

трон испытывает бета-распад. Распад нейтрона мы сейчас рассмотрим в качестве примера бета-распада.

Свободный нейтрон распадается в среднем за 17,3 *мин*. Это значит, что если в 10 *ч* утра у нас было 270 свободных нейтронов, то к 10 *ч* 17,3 *мин* останется только 100. Как же распадается нейтрон? По закону сохранения заряда нейтрон может распадаться на протон и электрон. Это превращение будет возможно и с энергетической точки зрения: энергия покоя протона плюс энергия покоя электрона меньше энергии покоя нейтрона на 1,5 энергии покоя электрона. Если бы мы детально рассмотрели законы сохранения энергии и импульса, то убедились бы, что при распаде на протон и электрон практически всю кинетическую энергию получит электрон. Таким образом, если предположить, что нейтрон распадается на протон и электрон:

$$n \rightarrow p + e^{-},$$

то энергия электрона здесь будет равна

$$[(\text{масса нейтрона}) - (\text{масса протона}) - (\text{масса электрона})]\, c^2,$$

где c — скорость света. Эта энергия составляет примерно 780 000 *эв*. Однако на опыте очень редко наблюдаются электроны такой энергии. Основная часть электронов обладает значительно меньшей энергией, причем встречаются электроны всех величин энергии — от 0 до 780 000 *эв*. Куда же исчезает остальная часть энергии? Быть может, электроны теряют энергию по дороге к прибору в столкновениях с атомами? Чтобы исследовать эту возможность, радиоактивное вещество помещали в калориметр и измеряли энергию, выделяющуюся при распаде. Вся энергия распада, казалось, должна была оставаться в калориметре, так как свинцовая оболочка задерживала внутри всё бета-излучение. Но выделяемая энергия оказалась меньше того, что должно было быть! Закон сохранения энергии, безусловно важнейший из всех законов сохранения, повис в воздухе.

Помимо закона сохранения энергии, бета-распад противоречил и другому основному принципу — закону

сохранения момента количества движения. Создалось тяжелое положение. В физических журналах начали появляться статьи, в которых отвергался закон сохранения энергии.

Выход из этого положения нашел швейцарский физик Паули в 1934 г. Он предположил, что при бета-распаде одновременно с электроном испускается еще одна частица, которая была затем названа нейтрино («нейтрончик»). Гипотеза Паули спасала законы сохранения. Действительно, исчезновение энергии теперь можно было возложить на нейтрино: освобождающаяся при бета-распаде энергия распределяется между электроном и нейтрино, и нейтрино уносит с собой ту долю энергии, которая считалась пропадавшей. Каковы же должны быть свойства нейтрино? Из закона сохранения заряда вытекает, что нейтрино не имеет заряда: заряд нейтрона равен нулю, а сумма зарядов протона и электрона также равна нулю. Масса нейтрино предполагалась близкой или равной нулю. Нейтрино обозначается обычно греческой буквой ν, так что бета-превращение нейтрона можем записать так:

$$n \to p + e^- + \nu.$$

Из закона сохранения момента количества движения был найден спин нейтрино, который оказался равным половине. Таким образом, нейтрино — фермион подобно электрону, протону и нейтрону.

Свойства нейтрино делают его «невидимой» частицей: нейтрино очень трудно наблюдать экспериментально. Частицу легко обнаружить, если она заряжена. Заряженная частица взаимодействует с электронами и протонами атома и при прохождении через атом может его разрушить, что легко обнаруживается. Тяжелая нейтральная частица — нейтрон задерживается в веществе значительно медленнее электронов, хотя она не имеет заряда. Но нейтрон сильно взаимодействует с ядрами, что позволяет обнаружить его по наносимым им разрушениям. Нейтрино не имеет заряда и, по-видимому, не имеет массы покоя. Кроме того, нейтрино очень слабо взаимодействует с веществом:

взаимодействие нейтрино с протонами и электронами примерно в 10^{12} раз, т. е. в тысячу миллиардов раз, слабее, чем электромагнитное взаимодействие. Итак, все свойства нейтрино отрицательны: нет заряда, нет массы покоя и очень слабое взаимодействие. Неудивительно, что нейтрино свободно проходило сквозь стенки приборов, которыми его пытались задержать. Всю толщу земного шара — от южного полюса к северному или в любом другом направлении — может пройти нейтрино, не вызывая превращений.

Гипотеза о нейтрино не устраняла всех трудностей: законы сохранения оставались, но вводилась новая частица. Чтобы исчерпать проблему, требовалось обнаружить нейтрино экспериментально. Но свойства нейтрино делали это исключительно трудной задачей. «Увидеть» нейтрино — это значит «увидеть» реакцию, вызываемую им. Но бета-распад связан с очень слабым взаимодействием (в 10^{12} раз слабее электромагнитного), и потому частота бета-превращений во много раз меньше электромагнитных переходов. Обратные превращения, которые может произвести нейтрино, будут также очень редкими явлениями. Одно из таких превращений состоит в следующем: при столкновении нейтрино с нейтроном могут образоваться протон и электрон

$$\nu + n \rightarrow p + e^{-}.$$

Однако для того, чтобы иметь шансы «увидеть» хотя бы одно такое превращение, необходим настолько мощный поток нейтрино, какого нельзя было и надеяться создать в те времена. Лишь в последние годы удалось использовать интенсивный поток нейтрино, выходящий из ядерного реактора, и обнаружить нейтрино. Об этом будет рассказано в гл. 5.

Хотя до последнего времени никому не удавалось «увидеть» нейтрино, физики были уверены в его реальности, так как встречали много косвенных доказательств его существования. Вскоре после того, как Паули выдвинул нейтринную гипотезу, Ферми построил на основе этой гипотезы теорию бета-распада, хорошо согласовавшуюся с опытом. Кроме того, по мере

изучения ядерных реакций и элементарных частиц открывались новые реакции, которые нельзя было объяснить без нейтрино и которые прекрасно укладывались в общую схему с нейтрино. Первой такой реакцией был позитронный бета-распад. Удивительная симметрия между электроном и позитроном указывала, что должны существовать и симметричные реакции. Действительно, в 1934 г. Ирен и Фредерик Жолио-Кюри открыли позитронный бета-распад, при котором ядро излучает позитрон и нейтрино, теряя один положительный заряд, так что из ядра с номером Z получается ядро с номером $Z-1$ и той же массы. Например, атомное ядро углерода с атомным номером 6 (атомный вес 11), испытывая позитронный бета-распад, превращается в ядро бора с тем же атомным весом, но с атомным номером 5:

$$C_6^{11} \to B_5^{11} + e^+ + \nu.$$

В дальнейшем, когда были обнаружены мезоны, оказалось, что распад мезонов также нельзя объяснить без помощи нейтрино. Нейтрино заняло важное место в мире элементарных частиц.

До сих пор неявно предполагалось, что существует только один тип нейтрино. Но это не обязательно. Во-первых, как у всякой частицы, и у нейтрино должна быть античастица. Если антинейтрино отличается от нейтрино, то возникает вопрос, какое свойство различно у этих частиц. При этом, разумеется, нужно решать также вопрос о том, в каких реакциях участвует нейтрино, а в каких — антинейтрино. Что называть нейтрино, а что антинейтрино — это, конечно, все равно. Во-вторых, вполне возможно, что существуют нейтрино-частицы разных типов (а, следовательно, и античастицы разных типов).

Новейшие данные о свойствах симметрии элементарных частиц, установленные в 1956—1957 гг., свидетельствуют в пользу существования антинейтрино. Данные же 1962 г. указывают, что имеется не один тип нейтрино-частиц. Рассказ о нейтрино мы продолжим в гл. 6 при обсуждении вопроса о несохранении четности и затем при описании нейтринных экспери-

ментов. Вплоть до гл. 6 мы, как правило, не будем делать различия между разными типами нейтрино, а также между нейтрино и антинейтрино.

Предсказанное теоретиками нейтрино увеличило число элементарных частиц до девяти, причем в те годы (1934—1935 гг.) только пять частиц (нейтрон, протон, позитрон, электрон и фотон) наблюдались на опыте, а существование остальных четырех (антипротона, антинейтрона, нейтрино и антинейтрино) не было подтверждено экспериментами.

Начало борьбы за частицы с высокой энергией

Физика элементарных частиц стремится к овладению высокой энергией. Подобно тому, как будущее авиации заключается в больших скоростях и больших высотах, так и будущее физики элементарных частиц — это частицы сверхвысокой энергии. Каждый этап в развитии авиации мы можем характеризовать завоеванной в ней скоростью. Говорят об эпохе винтовых самолетов, на смену которой пришла эпоха реактивных самолетов, и мы предвидим наступление эпохи ракетопланов. В нашем проникновении в мир элементарных частиц каждая завоеванная область энергии также представляет собой эпоху. Примером тому может служить открытие позитрона и его превращений. Если бы в природе не было частиц с энергией, превышающей миллион электрон-вольт, то мы не смогли бы наблюдать рождение и исчезновение позитрона.

Частицы с высокой энергией нужны для того, чтобы наблюдать процессы рождения и превращения элементарных частиц. Соотношение Эйнштейна

$$\text{энергия} = (\text{масса}) \times (\text{скорость света})^2$$

показывает, что чем больше масса частицы, тем больше должна быть энергия, необходимая для ее рождения. Для рождения пары электрон — позитрон требуется энергия не менее миллиона электрон-вольт, а для рождения антипротона нужна энергия в миллиарды

электрон-вольт. Итак, по мере продвижения в сторону бо́льшей энергии для нас будет открываться все больший круг частиц, рождение и превращения которых можно наблюдать.

Частицы с высокой энергией необходимы для того, чтобы выяснить, имеется ли у элементарных частиц структура.

Чем больше энергия сталкивающихся частиц, тем больше шансов узнать о происходящем на малых расстояниях между частицами, тем больше шансов выявить структуру частиц.

Это обстоятельство можно пояснить с помощью соотношения неопределенностей $\Delta p \cdot \Delta x \geqslant \hbar$ для координаты x и импульса p. Предположим, что с помощью столкновения двух частиц мы хотим узнать, что происходит на малом расстоянии a. Тогда нужно иметь в виду, что если координата частицы определена с точностью до a, то неопределенность в ее импульсе будет $\Delta p \geqslant \frac{\hbar}{a}$, и, следовательно, неопределенность в энергии частицы будет не меньше, чем $\sqrt{c^2(\Delta p)^2 + m^2c^4}$. Мы видим, что чем меньше интересующее нас расстояние a, тем больше должен быть импульс частиц и тем больше должна быть их энергия.

Первоначально единственным источником частиц с высокой энергией были космические лучи. Идущие из неведомых глубин межзвездного пространства космические лучи состоят из быстрых частиц, энергия которых иногда достигает гигантских величин, превосходя в сотни миллионов и миллиардов раз наибольшие величины энергии, получаемые сейчас в лабораториях. Попадая в земную атмосферу, частицы космических лучей — первичные частицы — тормозятся, растрачивая свою энергию в реакциях с атомными ядрами воздуха и образуя множество вторичных частиц. Подавляющая часть космических частиц, наблюдаемых на уровне моря, образована в земной атмосфере.

Энергия вторичных частиц значительно меньше, чем энергия первичных частиц. Между тем самое интересное для физиков — это реакции, вызываемые быстрыми первичными частицами. Поэтому физики стремятся

поднять приборы как можно выше, чтобы перехватить первичные частицы до того, как они замедлятся и размножатся в земной атмосфере. Физические станции по изучению космических лучей строятся в высокогорных районах; для наблюдений используются поднимающиеся на высоту нескольких десятков километров шары-зонды, снабженные автоматическими регистрирующими приборами, передающими показания на Землю, а также ракеты, взлетающие на высоты свыше ста километров. Сейчас изучение космических лучей уже вышло за пределы земной атмосферы — спутник сообщал нам о космических лучах в межпланетном пространстве. Усилия и настойчивость ученых при изучении космических лучей были не напрасны. Именно здесь был открыт позитрон, и, как мы увидим в дальнейшем, именно в космических лучах были впервые обнаружены почти все остальные новые частицы.

Но исследование элементарных частиц путем наблюдения космических лучей имеет ряд неудобств. Движение частиц космического излучения находится вне власти ученых: трудно, например, изучать зависимость превращений частиц от энергии и т. д. Кроме того, поток космических частиц очень слаб, и приходится долго выжидать для того, чтобы зарегистрировать интересное явление. Поэтому для детального исследования взаимодействия частиц невозможно опираться только на сведения, доставляемые космическими лучами. Нужно было создать искусственно частицы с высокой энергией — те «снаряды», которые позволят изучать свойства известных элементарных частиц и рождать новые частицы.

Для быстрого и подробного изучения элементарных частиц ученые должны были иметь в своем распоряжении интенсивные потоки различных частиц — снарядов самых разнообразных скоростей.

В борьбу за частицы с высокими энергиями физика вступила в начале 30-х годов, когда ученые начали строить ускорители заряженных частиц. Наиболее перспективным оказался циклический ускоритель — циклотрон, созданный по идее Лоуренса. Схема действия циклотрона изображена на рис. 13. Между полюсами

мощного магнита расположена металлическая коробка, разрезанная на две части *А* и *Б*, которые называются дуантами (магнитное поле перпендикулярно к плоскости коробки). Внутри этой коробки и ускоряются частицы. Воздух из коробки выкачан, чтобы он не мешал движению частиц. В промежутке между

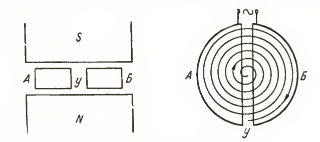


Рис. 13. Схема циклотрона.

дуантами действует переменное напряжение сравнительно небольшой величины (ускоряющий промежуток *у*).

Ускорение частиц происходит следующим образом. В центре, между дуантами, находится источник заряженных частиц, например протонов. Выброшенный оттуда протон ускоряется электрическим полем, действующим в промежутке между дуантами, и попадает в левый дуант. Здесь он движется только под действием магнитного поля, которое закручивает траекторию протона и возвращает его к ускоряющему промежутку. Частота изменения ускоряющего поля между дуантами постоянна и подобрана так, чтобы к моменту возвращения протона к разрезу оно действовало на него ускоряюще. Ускоренный электрическим полем протон проходит свой путь в правом дуанте уже по окружности бóльшего радиуса, но за то же время, что и ранее. В ускоряющем промежутке протон получает новую порцию энергии и т. д. Поле между дуантами меняется в «такт» с движением протона. С каждым оборотом скорость протона и радиус его траектории

увеличиваются, а время оборота остается постоянным. Путь протона имеет вид спирали. Ускоренные протоны выводятся из циклотрона и направляются в мишень. В результате столкновения с ядрами мишени могут произойти различные реакции.

Первые циклотроны строились для изучения строения атомных ядер. Расщепление ядер и изучение проблемы ядерных сил — в этом заключалась первоочередная задача физики в то время. Исследование атомных ядер дало очень многое для понимания свойств ядерных частиц — протонов и нейтронов.

Много полезных сведений о ядре доставили и другие ускорители — линейные ускорители, бетатроны, генераторы Ван-Граафа. Но значение этих ускорителей велико для ядерной физики, а в изучении элементарных частиц они не сыграли большой роли. Основное значение для физики элементарных частиц имели усовершенствованные циклотроны — синхроциклотроны, или фазотроны, а затем синхрофазотроны, о которых будет идти речь дальше.

ГЛАВА 3

ЧАСТИЦЫ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ОБЪЯСНЕНИЯ ЯДЕРНЫХ СИЛ

Сразу же после открытия нейтрона и строения ядра возник вопрос: какие силы удерживают протоны и нейтроны в ядре? Экспериментальные факты свидетельствовали, что ядерные силы обладают удивительными особенностями, из которых одна — колоссальная внутриядерная энергия — сыграла решающую роль в практическом использовании атомной энергии. Проблема ядерных сил стала важнейшей проблемой физики. И оказалось, что эту проблему можно решить только с помощью физики элементарных частиц: для объяснения ядерных сил требовались новые частицы.

Особенности ядерных сил

Ко времени открытия нейтронов были известны только два типа сил: электромагнитные силы и силы тяготения. Тяготению подвластны все тела в природе; любые два тела притягиваются друг к другу с силой, пропорциональной произведению их масс. Чем больше масса тел, тем сильнее тяготение. Силы тяготения велики для тел астрономического масштаба: законы тяготения управляют движением планет солнечной системы. Луна и спутник вращаются вокруг Земли под действием сил тяготения. Однако между обычными телами тяготение мало́: мы никогда не учитываем, например, силы тяготения между автомобилем и домами или между двумя кораблями.

В мире элементарных частиц, обладающих ничтожной массой, силы тяготения чрезвычайно малы, так что их можно не учитывать.

Электромагнитные силы действуют только между телами, которые имеют электрический заряд или в которых текут электрические токи. С электромагнитными силами приходится часто встречаться при изучении строения вещества. Можно сказать, что электромагнитные силы господствуют в мире атомов и молекул: электромагнитные силы действуют между электронами, электромагнитные силы связывают в атоме отрицательные электроны и положительно заряженное атомное ядро. Электрические силы между элементарными частицами во много раз превосходят силы тяготения. Например, сила электрического взаимодействия двух электронов примерно в 10^{43} раз больше силы тяготения между ними. Такое большое число трудно и представить себе. Силы электрические — это силы дальнодействующие: они медленно убывают с расстоянием. По закону Кулона, сила обратно пропорциональна квадрату расстояния — при увеличении расстояния в два раза сила уменьшается в четыре раза.

И электромагнитные силы и силы тяготения не способны обеспечить устойчивость ядра. Силы тяготения слишком малы, а электрические силы стремятся развалить ядро, так как они действуют в ядре между одноименно заряженными частицами (протонами). Чтобы понять устойчивость ядра, пришлось предположить, что между ядерными частицами действуют особые силы — ядерные силы неэлектромагнитной природы.

Какими же свойствами обладают ядерные силы? Опыты показали, что эти силы очень велики: несмотря на сильное электрическое отталкивание протонов, отдельная частица в ядре связана с энергией порядка 7 млн. *эв*. Это в 500 000 раз больше той энергии, которая связывает электрон в атоме водорода! Внутриядерная энергия может освобождаться при перестройке атомных ядер — при делении или объединении. В практическом применении внутриядерная энергия

известна как «атомная энергия». Открытие атомной энергии — это величайшее достижение современной науки и техники.

Следующая важная особенность ядерных сил касается размеров ядер. Ядра очень малы по сравнению с атомами — как мы говорили, атомные расстояния примерно в 10 000 раз больше ядерных. Экспериментальные сведения указывают нам, что вне ядра ядерные силы практически не действуют. Это значит, что ядерные силы имеют короткий радиус действия, т. е. силы велики на малых расстояниях порядка расстояний между частицами в ядре и почти равны нулю на бо́льших расстояниях. Радиус действия ядерных сил равен приблизительно $1{,}5 \cdot 10^{-13}$ *см*. Это свойство ядерных сил объясняет, почему в мире больших тел нам не приходится сталкиваться с ядерными силами.

Итак, большая величина и малый радиус действия — вот основные особенности ядерных сил, которые свидетельствуют об их неэлектромагнитной природе и которые должны быть объяснены теорией прежде всего.

Что такое взаимодействие? Виртуальные фотоны

Когда перед теоретиками возникла проблема объяснения ядерных сил, в их распоряжении уже была идея о том, что такое электромагнитное взаимодействие. Именно эта идея и была положена затем в основу объяснения ядерных сил. Более того, эта идея стала руководящей и при изучении всех остальных взаимодействий элементарных частиц. Важнейшее понятие, с которым при этом нам придется познакомиться, — это понятие о виртуальных процессах и, в частности, о виртуальных фотонах.

Электрическое взаимодействие двух зарядов хорошо известно многим еще из школьного курса: два точечных заряда взаимодействуют по закону Кулона. Поэтому на первый взгляд может показаться, что сама постановка вопроса «что такое электромагнитное взаимодействие» уже означает, что для элемен-

тарных частиц закон Кулона не годится. Но дело не в этом. Кулоновское взаимодействие существует и между элементарными частицами. Речь идет о том, *как* передается взаимодействие между частицами. Закон Кулона есть следствие более общего представления о взаимодействии — представления о том, что частицы взаимодействуют посредством поля. Закон Кулона не изменяется при переходе от больших зарядов к электрону, представление о поле радикально меняется. Вот эти-то новые представления о поле и таят в себе ключ к пониманию электромагнитных и ядерных сил и многих других взаимодействий между элементарными частицами.

Вспомним сначала о той роли, которую играет поле в обычном описании электромагнитного взаимодействия двух зарядов. Мы говорим, что вокруг электрического заряда всегда существует электрическое поле, которое проявляется в силах, действующих на любой другой заряд, внесенный в поле. Кулоновские силы между двумя покоящимися зарядами q_1 и q_2 объясняются с помощью представления о поле следующим образом: первый заряд q_1 создает электрическое поле $E = \frac{q_1}{r^2}$ (r — расстояние до заряда), второй заряд q_2 взаимодействует с этим полем с силой

$$F = \frac{q_1 q_2}{r^2}.$$

Иначе говоря, поле здесь играет роль своего рода посредника между зарядами: действие от одного заряда к другому передается посредством поля. Взаимодействие заряда с полем является при этом как бы первичным, а взаимодействие двух зарядов — вторичным, поскольку силы между зарядами получаются как следствие двух взаимодействий зарядов с полем: сперва первого заряда с полем (создание поля) и затем этого поля со вторым зарядом.

Первоначально считалось, что описание взаимодействия с помощью представления о поле — лишь один из способов описания и эквивалентно другому способу, основанному на предположении о возможности

мгновенных действий на расстоянии. До того как представление о поле получило всеобщее признание, в физике имелось два принципа, касающихся взаимодействия тел — «принцип близкодействия» и «принцип дальнодействия». Согласно принципу дальнодействия, считалось возможным, чтобы какое-либо тело в одной точке пространства тотчас же действовало на тело в другой точке пространства, минуя промежуточные области. Согласно же принципу близкодействия, все события в каком-либо месте и в определенный момент вполне определяются тем, что происходило в соседних точках пространства в предшествовавший момент времени. Принцип близкодействия, таким образом, отвергает возможность мгновенных действий на расстоянии согласно ему взаимодействие осуществляется посредством поля.

Представление об электромагнитном поле не есть только некоторый удобный способ для описания сил между частицами. Поле представляет собой вполне самостоятельную форму существования материи. Электромагнитное поле, созданное первым зарядом, существует независимо от того, имеется ли второй заряд. Сила, действующая на второй заряд при внесении его в поле, — это одно из возможных проявлений поля. Если первый заряд движется ускоренно, то существование поля мы можем отметить также по возникающему при этом излучению электромагнитных волн. Поле обладает энергией — электромагнитная энергия принадлежит полю, а не зарядам и токам. Всем хорошо известны быстропеременные электромагнитные поля, которые мы наблюдаем в виде радиоволн или в виде света или рентгеновских лучей. Вряд ли у когонибудь может возникнуть сомнение в том, что эти поля существуют в действительности. Столь же реальны и электромагнитные поля, передающие взаимодействие между зарядами. И то и другое — это разные примеры электромагнитного поля.

Мы подошли к главному вопросу этого раздела: как же изменяются представления о поле и взаимодействии частиц, если из мира больших тел перейти в мир элементарных частиц? С важнейшей квантовой

особенностью поля мы, по существу, знакомы: в микромире электромагнитное поле квантовано, и кванты поля — фотоны — трактуются как частицы (см. гл. 1, «Фотон»). Излучить поле — это значит излучить фотоны. Поэтому слова «заряд создает поле» приобретают здесь иное и, пожалуй, более конкретное содержание: заряд испускает кванты поля, или фотоны. Взаимодействие между зарядами мы получаем тогда, когда эти фотоны поглощаются другим зарядом. Итак, электромагнитное взаимодействие между двумя зарядами в мире элементарных частиц осуществляется посредством обмена фотонами: электроны как бы «перекидываются» фотонами (рис. 14). Слова «взаимодействие посредством электромагнитного поля» в микромире означают взаимодействие путем обмена фотонами.

Рис. 14. Взаимодействие двух электронов происходит посредством обмена виртуальными фотонами.

Такое объяснение взаимодействия не охватывает полностью сути дела, и нам нужно внести в него существенную поправку. Из нашего объяснения можно было бы вывести, что взаимодействие двух заряженных частиц вполне подобно связи между двумя радиолюбителями — передатчик одного радиолюбителя излучает радиоволны, т. е. фотоны, а радиостанция другого принимает эти сигналы и в свою очередь излучает фотоны. Глубокое различие между этими случаями — радиосвязью и взаимодействием частиц — состоит в том, что во время радиосвязи излучаются и поглощаются реальные фотоны, а при взаимодействии частицы обмениваются *виртуальными фотонами.*

Что же понимается под виртуальным фотоном?

Обратимся к деталям процесса взаимодействия частиц. В классической физике «простейшим» процессом, ведущим к взаимодействию частиц, является взаимодействие частицы и поля. С квантовой точки зрения этот первичный процесс заключается в рождении (или

в поглощении) фотона заряженной частицей. Но если мы рассмотрим такой процесс внимательно, то убедимся, что он противоречит закону сохранения энергии. Для конкретности в качестве заряженной частицы выберем электрон e^-, тогда основной (первичный) процесс можно записать в виде следующего превращения:

$$e^- \rightleftarrows e^- + \gamma.$$

Две стрелки здесь означают, что это превращение может идти как слева направо (рождение фотона электроном), так и справа налево (поглощение фотона электроном).

Пусть электрон покоится. Кинетическая энергия покоящегося электрона равна нулю, так что электрону неоткуда взять энергию, необходимую для рождения фотона. Обратный процесс — поглощение фотона свободным электроном — представляет собой частный случай превращения, которое мы рассматривали в связи с законами сохранения (см. стр. 24). Тогда мы также пришли к противоречию с законами сохранения. Иными словами, этот основной процесс в природе протекать не может. Такие воображаемые процессы называются *виртуальными* в отличие от реальных процессов, которые наблюдаются на опыте и идут с сохранением энергии. Виртуальные процессы, при которых закон сохранения энергии как бы нарушается, свойственны только квантовой теории. Однако, фактически, здесь нет нарушения закона сохранения энергии, поскольку виртуальные процессы на опыте не наблюдаются. Виртуальные процессы, или виртуальные переходы — это простой и удобный способ описания явлений, который не противоречит квантовым законам и занимает важное место в наглядной интерпретации явлений микромира. Виртуальными фотонами называются фотоны, излучаемые и поглощаемые в виртуальных процессах.

Разумеется, за представлением о виртуальных фотонах стоит определенный математический аппарат. Закон Кулона также можно получить с помощью представления о виртуальных фотонах. Но, кроме

закона Кулона, представление о виртуальных фотонах позволяет получить и другие формулы, которые нельзя найти другим путем, и эти формулы прекрасно согласуются с опытом. С помощью представления о виртуальных фотонах, например, получаются выражения для таких задач, как рассеяние фотона на электроне, как столкновение двух электронов, превращение пары электрон — позитрон в два фотона.

Как уже говорилось, различие между виртуальными и реальными фотонами связано с энергией: при излучении (воображаемом) виртуального фотона закон сохранения энергии не выполняется, а реальные фотоны (т. е. те фотоны, которые мы наблюдаем в опытах) излучаются всегда в соответствии с законом сохранения энергии. Это значит, что если мы сообщим электрону дополнительную энергию (например в соударении с другим электроном), то вместо виртуального фотона может быть испущен реальный фотон. Об этом обычно говорят иначе: при соударении электронов может образоваться фотон.

Почему же квантовые законы допускают описание явлений с помощью представления о виртуальных процессах? Для ответа на этот вопрос нужно возвратиться к соотношению неопределенностей для энергии и времени

$$\Delta E \cdot \Delta t \geqslant \hbar.$$

Это соотношение истолковывается как возможность отклониться от закона сохранения энергии на величину ΔE в течение времени

$$\Delta t \sim \frac{\hbar}{\Delta E}$$

при переходах или превращениях. Электрон может как бы занять энергию для испускания фотона на небольшое время при условии быстрой отдачи — поглощения фотона другим электроном. Можно сказать также, что виртуальные переходы с займом и возвратом энергии происходят настолько быстро, что они не могут быть обнаружены на опыте.

Здесь может возникнуть мысль: нельзя ли наблюдать виртуальные процессы, если построить прибор, с помощью которого мы могли бы наблюдать за электроном в течение промежутков времени, меньших чем «время» виртуального излучения фотона?

Предположим, что электрон излучил виртуальный фотон с энергией $h\nu$, тогда отклонение от закона сохранения энергии составит $\Delta E = h\nu$. По соотношению неопределенностей такое положение не может длиться более чем $\Delta t \sim \frac{\hbar}{\Delta E}$ секунд. Если мы собираемся наблюдать этот виртуальный переход, то нам нужно иметь прибор, фиксирующий присутствие фотона в течение промежутка времени t_0, меньшего, чем Δt: $t_0 < \Delta t$. Но наблюдение перехода за время t_0 приводит к неопределенности в энергии $\Delta E \sim \frac{\hbar}{t_0}$, а эта величина превосходит энергию виртуального фотона. Иначе говоря, при таком наблюдении мы можем сообщить электрону как раз ту энергию, которая нужна для излучения фотона $h\nu$.

Ядерные силы и ядерные мезоны

Первый шаг в решении проблемы ядерных сил сделал в 1934 г. советский физик акад. И. Е. Тамм, который предположил, что силы между нейтронами и протонами также передаются посредством каких-то элементарных частиц. Природа ядерных сил отличается от природы электромагнитных сил только тем, что здесь иные виртуальные частицы переносят взаимодействие — такова была идея Тамма. Встал вопрос: какая же частица (помимо фотона) может играть роль агента по передаче ядерного взаимодействия? При этом предполагалось, что частица (агент) должна быть значительно легче протона. Из известных в то время частиц после исключения фотона оставались электрон, позитрон и нейтрино. Вот с помощью этих-то частиц и была предпринята первая попытка объяснить ядерные силы. В основу были положены следующие

виртуальные бетапроцессы:

$$n \rightleftarrows p + e^- + \nu,$$

$$p \rightleftarrows n + e^+ + \nu.$$

Взаимодействие между протоном и нейтроном можно было тогда представить так: протон испускает виртуальные позитрон и нейтрино, превращаясь при этом в нейтрон, так что в виртуальном состоянии имеются два нейтрона, позитрон и нейтрино. Затем нейтрон поглощает позитрон и нейтрино, превращаясь в протон. В результате мы приходим к начальному состоянию: есть протон и есть нейтрон, но частицы как бы обменялись зарядами — протон стал нейтроном, а нейтрон стал протоном.

Одновременно с первой цепью виртуальных превращений может идти и вторая цепь, которая начинается с нейтрона: нейтрон испускает виртуальные электрон и нейтрино, превращаясь в протон, а затем другой протон поглощает электрон и нейтрино. Такой механизм виртуальных бета-процессов вызывает силы между нейтроном и протоном. Однако величина этих сил (их называют бета-силами) оказалась чрезвычайно малой.

Через год новую попытку вскрыть природу ядерных сил предпринял японский ученый Хидеки Юкава. Он объяснял неудачу первой попытки неверным выбором частиц, «переносящих» взаимодействие между нейтронами и протонами. «Если с помощью уже известных частиц нельзя объяснить ядерные силы, то это, наверное, потому, что нам известны еще не все элементарные частицы», — таково примерно было его рассуждение. Юкава предположил, что существуют необнаруженные на опыте элементарные частицы, необходимые для объяснения ядерных сил. Этим гипотетическим частицам Юкава приписал массу покоя и по аналогии с электромагнитным взаимодействием назвал их тяжелыми фотонами. Далее ему нужно было ответить на вопрос: какими свойствами должны

обладать тяжелые фотоны, чтобы можно было объяснить качественные особенности ядерных сил? Юкава произвел вычисления и пришел к замечательному выводу: радиус действия ядерных сил зависел только от массы тяжелых фотонов. Электрический заряд не влиял на радиус сил. Наблюдаемый радиус действия при этом получался, если масса тяжелых фотонов в 200—300 раз превосходила массу электрона. По своей массе тяжелые фотоны должны были занимать промежуточное положение между легкими электронами и тяжелыми протонами и нейтронами. Поэтому в дальнейшем тяжелые фотоны получили название мезонов («промежуточная частица»).

Рассмотрим теперь более подробно, почему же радиус ядерных сил связан с массой мезонов? Почему обмен виртуальными фотонами, не имеющими массы покоя, ведет к медленно убывающим электромагнитным силам, а обмен тяжелыми частицами ведет к быстро убывающим силам? Для ответа на эти вопросы сравним обмен виртуальными фотонами с обменом виртуальными мезонами. Пусть у нас есть два неподвижных протона, и силы между ними возникают благодаря обмену нейтральными мезонами (мы выбираем нейтральные мезоны для бо́льшей аналогии с фотонами; к тому же, радиус действия сил не зависит от заряда мезонов). Как и в случае электромагнитных сил, мы убеждаемся, что протон может излучать только виртуальный мезон, так как энергия при этом не сохраняется. Новым по сравнению с излучением виртуального фотона здесь будет то, что неопределенность в энергии теперь не может быть меньше энергии покоя мезона mc^2. Действительно, чтобы создать мезон с массой m, нужна по меньшей мере энергия покоя mc^2 (если мезон не имеет кинетической энергии). У протона (в нашем примере у неподвижного протона) такой энергии нет, так как масса покоя протона не может меняться: протон остается протоном. Тогда протон излучает виртуальный мезон, что приводит к неопределенности в энергии, не меньшей mc^2: с одной стороны, энергия этого состояния (протон плюс мезон) должна быть не меньше энергии покоя протона плюс энергия

покоя мезона mc^2, а с другой стороны, по закону сохранения энергии энергия этого состояния должна быть равна энергии протона до излучения, т. е. энергии покоя протона. Если неопределенность в энергии ΔE равна

$$\Delta E \sim mc^2,$$

то, согласно соотношению неопределенностей,

$$\Delta E \cdot \Delta t \sim \hbar;$$

такое положение может продолжаться в течение времени

$$\Delta t \sim \frac{\hbar}{mc^2}.$$

Иначе говоря, виртуальный мезон может двигаться от первого протона ко второму протону только в течение времени $\Delta t \sim \frac{\hbar}{mc^2}$. Очевидно, что наибольшее

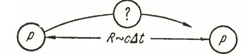


Рис. 15. Радиус действия ядерных сил.
За время Δt мезон достигнет расстояния $R \sim c\,\Delta t$.

расстояние, которое он сможет пройти за это время, и определяет радиус действия ядерных сил (рис. 15). Наибольшая скорость, с которой может двигаться мезон, не может превышать скорость света c. Поэтому наибольшее расстояние, которое может пройти мезон за время Δt, будет равно $c\Delta t$ или

$$R \sim \frac{\hbar}{mc}.$$

Это и будет радиус действия сил, передаваемых посредством частиц массы m. Мы видим, что радиус действия обратно пропорционален массе мезонов: чем больше масса мезонов, тем меньше радиус сил. Масса покоя фотонов равна нулю, и потому электромагнитные

силы медленно убывают с расстоянием: их радиус равен бесконечности. Если мы возьмем из опыта величину радиуса действия ядерных сил R, то можем найти массу мезонов, создающих ядерные силы:

$$m \sim \frac{\hbar}{cR}.$$

Подставляя сюда численные значения $\hbar \approx 10^{-27}$ *эрг/сек*, $R \approx 1{,}5 \cdot 10^{-13}$ *см*, $c = 3 \cdot 10^{10}$ *см/сек*, находим

$$m \approx \frac{10^{-27}}{3 \cdot 10^{10} \cdot 10^{-13} \cdot 1{,}5} \approx 200 m_e.$$

(Напомним, что масса электрона $m_e = 9 \cdot 10^{-28}$ *г* $\approx$ $\approx 10^{-27}$ *г*.) Это и есть результат теории Юкавы.

Здесь можно спросить: откуда же следует, что на опыте можно наблюдать мезоны, если для ядерных сил требуются только виртуальные мезоны, не наблюдаемые экспериментально?

Как мы видели, различие между виртуальным и реальным мезоном связано с энергией: при излучении виртуального мезона энергия не сохраняется, а при излучении реального мезона энергия сохраняется всегда. Поэтому мы можем превратить виртуальный мезон в реальный, если только сообщим протону (или нейтрону) необходимую энергию. До сих пор мы ничего не говорили о заряде мезонов, поскольку заряд не влияет на радиус действия сил. Из ряда соображений Юкава наделил мезоны положительным и отрицательным зарядами. Юкава надеялся, что с помощью мезонов он сможет объяснить не только короткодействующий характер ядерных сил, но и явление бета-распада. Поэтому из его теории вытекала также неустойчивость мезонов, которые должны были жить только миллионные доли секунды, распадаясь затем на электроны и нейтрино или позитроны и нейтрино.

Итак, теория предсказала новые частицы; теоретики создали картину ядерных сил, теперь дело было за экспериментаторами — нужно было либо отвергнуть, либо подтвердить эту картину. Устойчивость ядра должны были обеспечить виртуальные мезоны: излучаемые одними ядерными частицами и поглощаемые

другими, виртуальные мезоны должны были как бы «склеивать» протоны и нейтроны ядра. И первое, что требовалось от экспериментаторов, — найти частицы, играющие роль ядерного «клея».

В поисках ядерного мезона

Где же можно было увидеть ядерные мезоны? Какие опыты были необходимы для этого? Не могло ли здесь создаться то же положение, что и с неуловимым нейтрино? На эти вопросы было легко ответить, так как главные свойства ядерных мезонов были детально описаны теоретиками.

Ядерные мезоны должны были иметь заряд и, значит, их можно было обнаружить любыми способами — они могли вызвать ионизацию и оставить след в камере Вильсона или в фотоэмульсии. Но для образования мезона нужна была большая энергия: предполагаемая масса покоя мезона, равная 200—300 электронных масс, соответствует энергии в 100—150 млн. *эв*. Но иногда и такой энергии мало: если, например, мезоны рождаются при столкновении двух протонов или протона и нейтрона, то энергия налетающего протона должна быть примерно вдвое больше. Ускорители в конце 30-х годов были далеки от создания частиц столь высокой энергии, и поэтому можно было надеяться только на космические лучи. При этом нельзя было ожидать, что мезоны приходят на Землю с космическим излучением, поскольку мезоны предполагались неустойчивыми. Следовало ожидать, что мезоны образуются при столкновениях космических частиц с атомными ядрами атмосферы. Так как на своем пути к поверхности Земли космические лучи в первую очередь сталкиваются с атомами в верхних слоях атмосферы, то именно там, в верхних слоях атмосферы, и должна была находиться зона интенсивного мезонообразования. Оттуда и должен был идти на Землю поток мезонов.

Эти предположения физиков оказались верными. Через два года после опубликования работы Юкавы

среди множества следов, оставляемых космическими лучами, Андерсон и Недермейер и одновременно с ними Стрит и Стефенсон обнаружили необычные следы, принадлежавшие заряженным частицам. Масса частиц оказалась примерно в 200 раз больше массы электрона, что совпадало с предсказанием Юкавы. Эти частицы стали считать ядерными мезонами. Открытие

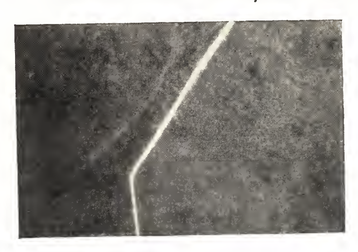


Рис. 16. След мезона в камере Вильсона.

новых частиц все расценили как блестящее подтверждение теории, и это придало новые силы для исследования этих частиц и ядерных сил. На рис. 16 приведена фотография следа мезона в камере Вильсона: мезон движется сверху и посредине камеры распадается.

В последующие годы было произведено множество экспериментов для выяснения свойств новых частиц. Физики изучали взаимодействие мезонов с ядрами, с электромагнитным полем. Все основные свойства открытых частиц совпадали со свойствами мезона Юкавы: новые частицы имели как положительный, так и отрицательный заряд и обладали нужной массой; затем была обнаружена неустойчивость мезонов, что также согласовалось с теорией.

Одновременно был достигнут прогресс в изучении ядерных сил. При этом были внесены дополнения в теорию Юкавы. В ядре из протонов и нейтронов возможны три типа сил: силы между нейтроном и протоном, силы между двумя нейтронами и силы между двумя протонами. Все эти три типа сил были детально исследованы на опыте, и оказалось, что все силы одинаковы по величине.

Можно было предположить, что все три типа сил объясняются одним и тем же механизмом с виртуальными мезонами. Но закон сохранения заряда запрещает обмен одним заряженным мезоном между двумя протонами или двумя нейтронами. Если считать, что бывают только заряженные мезоны, то тогда протон может испустить только положительный мезон, превращаясь в нейтрон. Излучение протоном отрицательного мезона невозможно, так как не существует протонов с зарядом 2. По этой же причине протон не может поглотить положительный мезон. Поэтому два протона (или два нейтрона) могут обменяться только парой заряженных мезонов: сперва первый протон испускает положительный мезон, превращаясь в нейтрон; затем второй протон испускает положительный мезон, превращаясь также в нейтрон, а потом мезоны вместе с нейтронами превращаются опять в протоны — происходит «встречный» обмен двумя положительными мезонами (рис. 17,*а*).

В противоположность этому, в согласии с сохранением заряда, силы между нейтроном и протоном могут создаваться путем обмена одним заряженным мезоном: например, протон излучает положительный мезон, который затем поглощается нейтроном. В результате та частица, которая до обмена мезоном была протоном, становится нейтроном и наоборот (рис. 17,*б*).

Таким образом, с помощью заряженных мезонов силы между одинаковыми частицами и силы между протоном и нейтроном объяснялись различными способами: в первом случае допускался только обмен парами мезонов, а во втором случае частицы могли обмениваться одним мезоном. Это было странным, поскольку силы всех трех типов равны по величине.

Тогда теоретики предположили, что существует не два типа мезонов — положительные и отрицательные, а три типа — положительные, отрицательные и нейтральные. С помощью обмена одним нейтральным мезоном можно легко объяснить силы между одинаковыми частицами. Мы это уже сделали на стр. 91 (см. рис. 15) для двух протонов, когда сравнивали ядерные силы с электромагнитными.

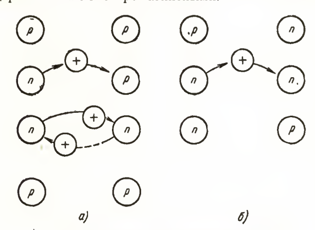


Рис. 17. Попытка объяснения ядерных сил с помощью только заряженных мезонов.

Но все эти уточнения теории Юкавы и эксперименты не внесли ясность в положение, а скорее запутали дело. Результаты сравнения теории с опытом в той части, которая касалась поведения частиц, были неутешительны. Главным пунктом, где теория расходилась с опытом, было отношение новых частиц к атомному ядру. Чтобы были велики ядерные силы, теоретические мезоны должны были сильно взаимодействовать с ядром. Это значит, что все реакции между мезонами и ядрами должны были идти очень быстро и легко: мезоны должны легко рассеиваться ядрами, легко рождаться и легко поглощаться ядрами. Мезоны действительно рождались легко и в большом количестве в верхних слоях атмосферы при соударениях косми-

ческих частиц с ядрами. Но когда мезоны попадали на уровень моря, то они обнаруживали другие свойства: они слабо взаимодействовали с ядрами. Мезоны замедлялись в веществе подобно любой другой заряженной частице и затем, остановившись, могли находиться длительное время вблизи ядра, пока не распадались — мезоны почти не поглощались ядрами.

Между тем «ядерные» мезоны, которым свойственно сильно взаимодействовать с ядрами, должны были бы вести себя иначе. Отрицательные мезоны Юкавы должны были бы очень быстро, не дожидаясь распада, поглощаться ядрами (положительные мезоны отталкиваются ядрами). Количественная оценка приводила к разнице в 10^{12} раз между наблюдаемым и ожидаемым — во столько раз взаимодействие при рождении мезона отличалось от взаимодействия перед смертью мезона, во столько раз время нахождения мезона вблизи ядра было больше времени, предсказываемого теорией для ядерного мезона.

Таково было положение, которое сложилось через 10 лет после предсказания мезонов теорией. Опытные факты, казалось, противоречили не только теории ядерного мезона, но и фундаментальному принципу мира элементарных частиц — принципу обратимости реакций: реакция рождения (в верхних слоях атмосферы) шла быстро, а поглощение ядром (на уровне моря) наблюдалось очень редко.

Парадокс был устранен в 1947 г., когда Оккиалини и Поуэлл открыли в космическом излучении еще один тип мезонов, которые в короткое время распадались, образуя в числе продуктов распада открытые ранее мезоны. Свою частицу Оккиалини и Поуэлл назвали π-мезоном (пи-мезон, «первичный» мезон), и в дальнейшем этот мезон был отождествлен с ядерным мезоном. Мезоны, которые ошибочно принимались за ядерные мезоны и которые слабо взаимодействуют с ядрами, получили название μ-мезонов (мю-мезон, или мюон).

История жизни пи-мезонов и мю-мезонов такова. Пи-мезоны образуются космическими лучами в основном на большой высоте. Пролетев небольшое расстояние,

они распадаются на мю-мезоны, которые живут гораздо дольше и потому успевают в значительном числе попасть на уровень моря, где в плотном веществе останавливаются и распадаются. Пи-мезоны сильно взаимодействуют с ядрами и легко рождаются



Рис. 18. Фотография распада атомного ядра азота в пузырьковой камере, вызванного поглощением отрицательного пи-мезона.

при столкновении протонов и ядер, отрицательные пи-мезоны легко поглощаются ядрами, приводя к образованию «звезд» (рис. 18).

Итак, теория восторжествовала, и через 12 лет после предсказания ядерный мезон был, наконец, найден. Но открытие Поуэлла и Оккиалини еще не завершило проверку теории, оно только подтвердило правильность идеи о природе ядерных сил. Кроме того, еще не все пи-мезоны были открыты: теория предсказывала еще существование нейтрального пи-

мезона. Наблюдать нейтральные частицы всегда труднее, чем заряженные, поскольку они не оставляют следов. К тому же, как выяснилось в дальнейшем, нейтральный пи-мезон обладает очень малым временем жизни. Благодаря этому наблюдение нейтрального пи-мезона становилось весьма трудным делом. Он был найден только после того, как были созданы искусственные мезоны.

Подытожим наши знания о происхождении ядерных сил и пи-мезонах, воспользовавшись наглядной записью превращений. Взаимодействие протона и нейтрона с пи-мезонами влечет за собой возможность излучения и поглощения пи-мезонов протонами и нейтронами. Интересующие нас основные виртуальные процессы можно представить так:

$$p \rightleftarrows n + \pi^+$$

— протон виртуально распадается на нейтрон и положительный пи-мезон;

$$n \rightleftarrows p + \pi^-$$

— нейтрон может виртуально превратиться в протон и отрицательный пи-мезон;

$$p \rightleftarrows p + \pi^0, \qquad n \rightleftarrows n + \pi^0$$

— протоны и нейтроны могут испускать виртуальные нейтральные пи-мезоны. Две стрелки обозначают, что процессы могут идти в обе стороны: например, виртуальный пи-мезон и нейтрон дают протон и т. д.

Перечисленные превращения представляют в наглядной форме «первичное» взаимодействие, которое является аналогом взаимодействия заряда с электрическим полем. Взаимодействие между ядерными частицами (ядерные силы) является «вторичным» и изображается с помощью цепочки виртуальных превращений. Взаимодействие нейтрона и протона таково:

$$p + n \rightleftarrows n + \pi^+ + n \rightleftarrows n + p$$

— протон испускает виртуальный пи-мезон, который затем поглощается нейтроном, так что частицы в результате обмениваются зарядом. Нейтрон-протонные

силы могут также вызываться нейтральными мезонами

$$p + n \rightleftarrows p + \pi^0 + n \rightleftarrows p + n.$$

Здесь промежуточное состояние (виртуальное состояние) содержит π^0-мезон; обмена зарядом при этом не происходит. Аналогичным образом изображается взаимодействие между одинаковыми частицами. Например, для двух протонов цепочка реакции

$$p + p \rightleftarrows p + \pi^0 + p \rightleftarrows p + p$$

соответствует обмену виртуальным π^0-мезоном.

Продолжение борьбы за частицы с высокой энергией

С каждым новым успехом ядерной физики возрастало значение проблемы ядерных сил. С каждым годом расширялось использование атомной энергии; при этом везде — в реакторах, атомной и водородной бомбах — «работали» ядерные силы. Но, освобождая атомную энергию, физики не были в состоянии подробно описать порождающие ее силы. Открытие пи-мезонов, по-существу, положило только начало настоящему изучению ядерных сил, указав поле ближайшей деятельности: чтобы знать ядерные силы, нужно было также знать и свойства пи-мезонов. И для этого в первую очередь требовались частицы с высокой энергией. Нельзя было опираться в изучении мезонов только на те редкие фотографии, которые удавалось получить в космических лучах. Нельзя было надеяться на быстрый прогресс в понимании ядерных сил, изучая столкновения ядерных частиц с высокой энергией только по тем немногим событиям, которые иногда происходили с космическими частицами. Нужно было создавать пи-мезоны искусственно, а для этого физикам было необходимо иметь в своем распоряжении мощные потоки быстрых частиц.

На первом этапе достаточно было получить протоны с энергией в 350—500 млн. *эв*, что позволило бы

не только производить искусственные пи-мезоны, но и изучать их столкновения с ядрами. Но продвижение в область высокой энергии затормозилось в конце 30-х годов. Циклотроны оказались неспособными ускорять протоны до энергии, превышающей 20 млн. *эв*, и этот предел был связан не с техническими возможностями, но с принципом действия циклотрона. Чтобы получить частицы с более высокой энергией, требовалось перешагнуть через этот предел, видоизменив принцип работы ускорителя. Это стало возможным благодаря «принципу автофазировки», который был предложен в 1944 г. советским ученым В. И. Векслером и несколько позже американским физиком Мак-Милланом. Новые приборы стали называть синхроциклотронами (иногда их называют фазотронами).

Синхроциклотрон — это усовершенствованный циклотрон. В синхроциклотроне протоны также движутся по спирали (рис. 13), «подстегиваемые» электрическим полем, действующим в ускоряющем промежутке. Но теперь частота электрического поля не является постоянной, а меняется со скоростью частицы. Дело в том, что длительность оборота протона в магнитном поле циклотрона не зависит от скорости только при малых скоростях, когда можно пренебречь зависимостью от скорости полной массы частицы $\overline{m} = \frac{E}{c^2}$; в общем случае длительность оборота протона T пропорциональна полной массе $\overline{m}$:

$$T = \frac{2\pi\overline{m}}{e_p H}$$

(e_p — заряд протона, H — магнитное поле). При больших скоростях зависимость T от скорости становится заметной (см. рис. 2).

Если же с каждым оборотом протона время оборота меняется, а частота изменения электрического поля на дуантах остается неизменной, то, в конце концов, протон может подойти к ускоряющему промежутку тогда, когда там действует не ускоряющее, а тормозящее электрическое поле. Это обстоятельство

и кладет предел возможностям циклотронов. Если же менять частоту электрического поля, то траектория протонов автоматически становится устойчивой, поле в ускоряющем промежутке будет в среднем ускорять протоны. Благодаря этому возможности ускорителя значительно раздвигаются. В этом и состоит суть принципа автофазировки в приложении к синхроциклотрону.

Помимо автофазировки, синхроциклотроны отличаются от циклотронов и совершенно иными масштабами. Энергия протонов, достигаемая в синхроциклотронах, в 30—40 раз выше, чем в циклотронах, что и определяет размеры синхроциклотронов. Чем больше энергия частицы, тем больше радиус окружности, по которой она движется в магнитном поле, и чем сильнее магнитное поле, тем меньше радиус.

Поэтому при увеличении энергии, достигаемой в циклическом ускорителе, увеличиваются и размеры ускорителя и вес магнита. При этом вес магнита возрастает особенно быстро, поскольку площадь полюсов магнита увеличивается пропорционально квадрату радиуса траектории частицы: весь путь частицы, ускоряемой в циклотроне или синхроциклотроне, проходит между полюсами магнита (см. рис. 13). Размеры установки можно уменьшить, увеличивая магнитное поле, но это представляет собой сложную задачу. В то время как вес электромагнита циклотронов исчисляется десятками тонн, вес электромагнита в синхроциклотронах достигает несколько тысяч тонн. Например, электромагнит крупнейшего в мире синхроциклотрона, работающего в Объединенном институте ядерных исследований в г. Дубно (СССР), весит 7000 *т*. Диаметр полюсов этого магнита равен 6 *м*. Внутри ускорителя при его работе образуются мощные потоки различных частиц, в том числе нейтронов и гамма-лучей, особенно опасные, поскольку они сравнительно слабо поглощаются веществом. Защита от вредного действия этих излучений представляет здесь особую задачу. Толстые железобетонные стены отделяют ускоритель от окружающего мира, а управление синхроциклотроном осуществляется с расстояния. Фо-

тография внешнего вида синхроциклотрона Объединенного института ядерных исследований приведена на рис. 19.

Начиная с 1949 г. наступила эра синхроциклотронов. Первый синхроциклотрон был пущен в 1949 г. в Калифорнийском университете (США). В конце 1949 г.

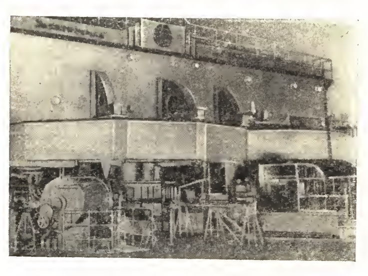


Рис. 19. Синхроциклотрон на 680 млн. *эв*.

в Советском Союзе было закончено строительство синхроциклотрона, на котором после его реконструкции в 1953 г. была достигнута рекордная энергия в 680 млн. *эв*. На протяжении ближайших лет вступили в строй еще несколько аналогичных ускорителей. Новые данные о мезонах стали накапливаться в большом количестве; наступила новая эпоха в изучении мезонов. Можно сказать, что с помощью синхроциклотронов физики проникли в мир пи-мезонов. Сразу же после пуска первого синхроциклотрона были получены интересные сведения о взаимодействии созданных в нем мезонов с протонами и нейтронами. Вскоре в

ускорителе был обнаружен нейтральный пи-мезон, существование которого, как мы видели, вытекало из теоретических соображений. Пи-мезоны очень быстро из частиц неизвестных стали знакомыми частицами. Сейчас пи-мезоны изучены столь же хорошо, как и ядерные частицы — нейтроны и протоны.

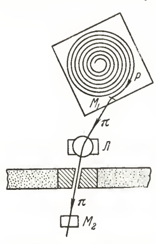


Рис. 20. Получение искусственных пи-мезонов.

Как же создаются в ускорителе искусственные мезоны? Внутри ускорительной камеры помещается мишень M_1 (см. рис. 20), которая бомбардируется быстрыми протонами (или альфа-частицами, или дейтонами). При окончательной энергии в 680 млн. *эв* скорость протонов составляет 240—250 тыс. *км/сек*, что в 30 000 раз превосходит скорость спутника. При ударе таких протонов о мишень образуются пи-мезоны, фотоны, электронно-позитронные пары, а также потоки нейтронов, выбитых в результате следующих основных реакций:

$$1)\ p + p \rightarrow p + n + \pi^+;$$
$$2)\ p + n \rightarrow p + p + \pi^-;$$
$$3)\ p + p \rightarrow p + p + \pi^0;$$
$$4)\ p + n \rightarrow p + n + \pi^0.$$

В первой из этих реакций протон и один из протонов ядра мишени при соударении превращаются в протон, нейтрон и положительный пи-мезон. Во второй реакции столкновение протона с нейтроном ядра мишени влечет за собой рождение отрицательного мезона с превращением нейтрона в протон. Третья и четвертая реакции ведут к образованию нейтральных мезонов.

Из ускорителя поток пи-мезонов через особые отверстия в защитной стенке выпускают в лабораторию, где он направляется на мишень M_2 из интересующих нас веществ. В качестве мишени можно также использовать фотопластинки, тогда все реакции будут происходить в фотоэмульсии. На пути между ускорителем и мишенью M_2 пи-мезоны пропускаются через магнитную линзу $Л$, которая из общего потока выделяет только пучок пи-мезонов определенной скорости и направления движения.

Мю-мезоны и пи-мезоны

Познакомимся теперь со свойствами мезонов. Семейство пи-мезонов состоит из трех частиц: положительной, отрицательной и нейтральной. Мю-мезоны встречаются двух типов: положительные и отрицательные. Массы мезонов измерены весьма точно: масса мю-мезонов обоих типов равна 206,7 электронной массы; масса заряженных пи-мезонов примерно на 66 электронных масс больше: она равна 273,2 электронной массы. Нейтральный пи-мезон несколько легче заряженных — его масса равна 264,2 электронной массы. Разница в массах нейтрального и заряженного пи-мезонов не случайна — она, по-видимому, связана с зарядом. Несколько позднее мы вернемся к этому вопросу.

Положительный и отрицательный мю-мезоны — это частица и античастица (или наоборот). То же самое касается положительного и отрицательного пи-мезона. Так как каждой частице соответствует античастица, то мы должны были бы ожидать, что имеется два нейтральных пи-мезона: мезон-частица и мезон-античастица. На самом деле имеется только один нейтральный пи-мезон, так как нейтральный пи-мезон совпадает со своей античастицей.

Вопрос о спине мезонов долгое время волновал физиков, так как от спина мезонов зависело, какие мезоны (пи-мезоны или мю-мезоны) можно было отождествить с ядерными. Согласно теории, ядерный

мезон должен иметь целый спин: либо нуль, либо единицу. Пока мезоны наблюдались только в космических лучах, их спин нельзя было определить с достоверностью. Лишь после того, как мезоны стали создаваться искусственно, было доказано, что спин пи-мезона равен единице, а спин мю-мезона — половине. Это было окончательным доводом в пользу того, что роль ядерных мезонов принадлежит пи-мезонам.

Таким образом, пи-мезоны и мю-мезоны относятся к разным группам частиц: пи-мезоны — это бозоны, а мю-мезоны являются фермионами подобно протону и позитрону. На какую же из этих частиц более похож мю-мезон? Как ведет себя положительный мю-мезон при движении в веществе: как легкий протон или как тяжелый позитрон?

Чтобы выяснить эти вопросы, сравним взаимодействия мю-мезона, позитрона и протона. Как для мю-мезона, так и для позитрона самое сильное взаимодействие — электромагнитное. Протон же может еще сильно взаимодействовать с ядрами и пи-мезонами. Поэтому движение мю-мезона и позитрона в веществе будет определяться их электромагнитным взаимодействием, в то время как столкновения протонов с ядрами вызываются главным образом сильным ядерным взаимодействием. Итак, по своим свойствам положительный мю-мезон более походит на тяжелый позитрон, чем на легкий протон.

До сих пор мы классифицировали элементарные частицы по массе, спину и заряду. Но для мезонов этих величин недостаточно, так как мезоны неустойчивы. Даже будучи предоставлены самим себе, без видимых причин мезоны распадаются, превращаясь в другие частицы. Степень неустойчивости (вероятность распада) характеризуется временем жизни.

Время жизни равно тому времени, за которое в результате распада число первоначальных частиц уменьшится в 2,7 раза. Впервые мы встретились с распадом элементарной частицы на примере нейтрона — протон, электрон, позитрон, нейтрино и фотон устойчивы. Но вероятность распада нейтрона незначительна — свободный нейтрон обладает очень большим време-

нем жизни (17,3 *мин*). По сравнению с нейтроном время жизни мезонов очень мало́: время жизни мю-мезонов равно $2{,}2 \cdot 10^{-6}$ *сек*, т. е. только двум миллионным долям секунды, а время жизни заряженных пи-мезонов и того меньше — оно составляет $2{,}6 \cdot 10^{-8}$ *сек*, т. е. примерно три стомиллионных доли секунды. Эти

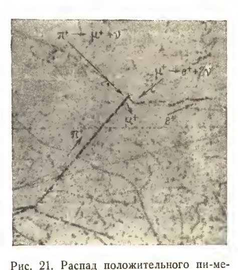


Рис. 21. Распад положительного пи-мезона в пузырьковой камере.

времена очень малы абсолютно, однако они велики в шкале времен мира элементарных частиц по сравнению с ядерным временем 10^{-23} *сек*. Так как мезоны могут двигаться с громадными скоростями, которые сравнимы со скоростью света, то за свою жизнь и пи-мезоны и мю-мезоны успевают проделать значительный путь. Время жизни нейтрального мезона значительно меньше — эти мезоны живут в среднем 10^{-15}—10^{-16} *сек*.

Каким же образом распадаются мезоны? На рис. 21 приведена фотография двойного распада: сначала распадается пи-мезон, превращаясь в мю-мезон, а затем распадается мю-мезон, оставляя после себя

позитрон. Эта фотография показывает то, что произошло внутри пузырьковой камеры при попадании в нее положительного пи-мезона. Путь мезона, который двигался слева, постепенно утолщается по мере потери скорости — это соответствует увеличению ионизации при замедлении; наконец, в пути появляется излом — частица остановилась и распалась; далее направо движется мю-мезон — его след несколько тоньше следа пи-мезона; мю-мезон останавливается и распадается, из конца следа мю-мезона выходит тонкий след позитрона.

Почему же следы частиц изламываются в точке распада? Как согласовать это с законом сохранения импульса: ведь распадается остановившаяся частица (т. е. ее импульс равен нулю), а образуется частица с отличным от нуля импульсом? Прежде всего заметим, что один след, выходящий из точки распада, вовсе не означает, что продукты распада состоят только из одной частицы. Фотопластинка регистрирует только заряженные частицы, так что из точки распада могут выходить невидимые пути нейтральных частиц. Какие нейтральные частицы и сколько их получается при распаде — это можно определить с помощью законов сохранения.

В качестве примера того, как законы сохранения помогают отыскать невидимую частицу, рассмотрим распад положительного пи-мезона, при котором появляется положительный мю-мезон. Опыт показывает, что при распаде пи-мезонов всегда образуются мю-мезоны с одной и той же энергией. Если, например, пи-мезон распадается в эмульсии фотопластинки, то следы образовавшихся мю-мезонов всегда оказываются одной и той же длины. Это значит, что пи-мезон распадается на две частицы, так как только в этом случае энергия частиц распада будет строго определенна. Вторая частица распада должна быть нейтральной, как мы только что установили. Масса этой частицы вычисляется из закона сохранения энергии, который в нашем случае гласит:

$$m_{\pi}c^2 = E_{\mu} + E_x,$$

т. е. энергия покоя пи-мезона $m_\pi c^2$ идет на образование мю-мезона с энергией E_μ и неизвестной частицы с энергией E_x. Так как энергия мю-мезона известна, то отсюда определится энергия неизвестной частицы. Кроме этого, мы знаем также и ее импульс — по закону сохранения импульса он равен импульсу мю-мезона и направлен в противоположную сторону: частицы разлетаются в разные стороны из точки распада. Энергия и импульс однозначно определяют массу нейтральной частицы, которая равна нулю в пределах ошибок опыта.

Спин нейтральной частицы можно найти из закона сохранения момента количества движения. При целом спине пи-мезона и полуцелом спине мю-мезона единственной возможностью для нейтральной частицы будет полуцелый спин. Но нейтральная частица с полуцелым спином и без массы покоя нам уже известна — это нейтрино ν, которое было введено теоретиками для объяснения бета-распада (гл. 2). И точно так же, как и в бета-распаде, присутствие нейтрино в распаде пи-мезона было выявлено с помощью законов сохранения. Реакцию распада положительного пи-мезона можно теперь изобразить так:

$$\pi^+ \to \mu^+ + \nu.$$

Если мы знаем схему распада положительного пи-мезона, то можем написать и схему распада отрицательного пи-мезона. Ведь отрицательный мезон π^- — античастица по отношению к π^+, а отрицательный мю-мезон μ^- — античастица по отношению к μ^+. Если пи-мезон распадается на мю-мезон и нейтрино, то антипи-мезон должен распадаться на антимю-мезон и антинейтрино $\bar{\nu}$:

$$\pi^- \to \mu^- + \bar{\nu}.$$

Как и в случае пи-мезона, фотография распада на рис. 21 вместе с законами сохранения может обрисовать картину распада мю-мезона. Из законов сохранения можно установить, что в конце пути положительного мю-мезона появляются два нейтрино, а не

одно, как в распаде пи-мезона. При распаде отрицательного мю-мезона могут тогда образоваться электрон и два антинейтрино

$$\mu^- \rightarrow e^- + 2\bar{\nu}.$$

Но имеется и другая возможность. Законы сохранения энергии, импульса и момента количества движения не позволяют нам сделать выбор между распадом с появлением двух нейтрино и распадом с появлением нейтрино и антинейтрино:

$$\mu^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + \nu + \bar{\nu}.$$

Эта неопределенность в схеме распада мю-мезона была устранена только в 1956 г., когда распад мю-мезонов вновь привлек внимание физиков в связи с вопросом о четности (см. гл. 6). Новые опыты установили, что мю-мезон распадается по второй схеме, т. е. с образованием нейтрино и антинейтрино.

Интересные выводы связаны с распадом нейтрального пи-мезона π^0. Этот пи-мезон не может распадаться на мю-мезон, поскольку нет нейтрального мю-мезона. Законы сохранения заряда и энергии допускают распад π^0 на электронно-позитронные пары и фотоны. Действительно, в экспериментах изредка наблюдаются такие реакции распада π^0:

$$\pi^0 \rightarrow e^+ + e^- + \gamma, \quad \pi^0 \rightarrow 2e^+ + 2e^-.$$

Однако не эти пути распада нейтрального пи-мезона определяют его время жизни. В подавляющем числе случаев π^0 распадается на два фотона:

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma.$$

Но как же нейтральная частица может распадаться на фотоны? Ведь взаимодействовать с электромагнитным полем — рождать и поглощать фотоны — могут только заряженные частицы. Как же возникает взаимодействие между нейтральным пи-мезоном и электромагнитным полем, приводящее к распаду на фотоны? Для ответа на эти вопросы нам нужно возвратиться к взаимодействию пи-мезонов с нейтрона-

ми и протонами. Нейтроны и протоны излучают и поглощают пи-мезоны; обмен виртуальными пи-мезонами ведет к возникновению ядерных сил — таково было объяснение природы ядерных сил. В этой картине взаимодействия нейтроны и протоны, с одной стороны, и пи-мезоны — с другой, играют разную роль: нейтроны и протоны не рождаются и не поглощаются, оставаясь неизменными, в то время как пи-мезоны непрерывно исчезают и возникают вновь, как бы перенося взаимодействие между протонами и нейтронами. Но возможно и иное положение, когда рождаются и поглощаются протоны и антипротоны; примером таких процессов и является распад нейтрального пи-мезона. Нейтральный пи-мезон может превратиться в пару протон — антипротон:

$$\pi^0 \to p + \bar{p}.$$

В эксперименте для наблюдения такого превращения в столкновениях π^0-мезона с ядрами необходимо, чтобы π^0-мезон имел очень большую энергию, так как энергия покоя протона и антипротона исчисляется примерно 2 млрд. *эв*. Именно вследствие этого образование протонов и антипротонов наблюдается редко. Но при распаде нейтральный пи-мезон не должен обладать такой энергией, поскольку его превращение в протон — антипротонную пару может быть виртуальным (без сохранения энергии).

Картину распада π^0 можно представить себе следующим образом. Нейтральный пи-мезон π^0 сперва превращается виртуально в пару протон — антипротон. Эта реакция протекает очень быстро, так как пи-мезоны сильно взаимодействуют с протонами и антипротонами. Протон и антипротон обладают электрическими зарядами и потому могут взаимодействовать с электромагнитным полем; благодаря этому взаимодействию они аннигилируют, превращаясь в два фотона. Таким образом, распад π^0 происходит через виртуальное состояние с протоном и антипротоном:

$$\pi^0 \to \bar{p} + p \to 2\gamma.$$

При виртуальном образовании пары $\bar{p} + p$ энергия не сохраняется так же, как и при ее виртуальной аннигиляции. Эта промежуточная ступень в распаде π^0, как и все виртуальные процессы, является чисто умозрительной и служит для описания превращения в целом. В реальной реакции из всей цепочки с виртуальными звеньями наблюдаются только начальные и конечные продукты, для которых закон сохранения выполняется всегда. Энергия обоих фотонов будет равна энергии покоя π^0-мезона $m_\pi c^2$, или 135 млн. *эв*. Такие фотоны и были зарегистрированы в опытах.

ГЛАВА 4

ПЕРВЫЕ ИТОГИ

Открытие пи-мезонов завершило первую часть нашего проникновения в мир элементарных частиц. Соединенными усилиями теоретиков и экспериментаторов были найдены ключи к важнейшим проблемам: и в проблеме ядерных сил, и в бета-распаде, и во многих других вопросах физики считали себя на верном пути. Если бы не мю-мезоны, то с помощью остальных частиц можно было бы создать стройную картину строения вещества, в которой каждой частице нашлось бы свое место. Но как бы ни портили мю-мезоны наши планы относительно того, каким должно быть строение вещества, они были частицами с понятными свойствами. Новые частицы, с которыми физики познакомились после пи-мезонов, оказались частицами с непонятными свойствами. Вот почему теперь настало время подвести итоги и посмотреть, как физики представляли себе в этот период мир элементарных частиц.

Частицы и взаимодействия

Наше знакомство с миром элементарных частиц мы начинали с четырех элементарных частиц (электрон, фотон, протон и нейтрон), а теперь в нашем распоряжении имеется четырнадцать частиц. Правда, из этого числа четыре частицы (антипротон, антинейтрон, нейтрино и антинейтрино) тогда, в 1947 г., были известны только в теории, но их существование вытекало из настолько общих законов, что в нем трудно было усомниться. Все 14 частиц подразделяются на

две большие группы: фермионы (частицы с полуцелым спином) и бозоны (частицы с целым спином). К фермионам относятся электроны, мю-мезоны, протоны, нейтроны и их античастицы. Группу бозонов составляют фотоны и пи-мезоны.

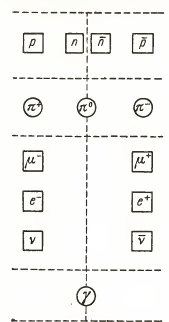


Рис. 22. Четырнадцать элементарных частиц.

Слева от вертикали расположены частицы, справа — античастицы; фотон γ и мезон π^0 совпадают со своими античастицами. Фермионы обозначены квадратиками, бозоны — кружками.

По массам и свойствам все частицы удобно разбить на четыре группы (см. рис. 22). Нейтрон и протон с античастицами образуют группу тяжелых фермионов. Электрон, позитрон, оба нейтрино и мю-мезоны входят в группу легких фермионов, или лептонов. Семейство пи-мезонов представляет тяжелые бозоны. Особое место занимает фотон с массой покоя, равной нулю.

Каждая из элементарных частиц, кроме мю-мезонов, имеет свое назначение в строении вещества. Протоны и нейтроны служат «строительными камнями» атомного ядра; электроны вместе с атомными ядрами образуют атомы и молекулы. В атомах действуют электромагнитные силы, которые передаются с помощью фотонов. Фотоны также излучаются и поглощаются атомами при переходах с одного уровня на другой. Пи-мезоны осуществляют ядерное взаимодействие. Нейтрино необходимо для того, чтобы сохранялась энергия при бета-распаде. Античастицы существуют постольку, поскольку природа симметрична относительно знака заряда (более точно, относительно зарядового сопряжения).

Интересное обстоятельство: стабильное вещество построено только из фермионов (протонов, нейтронов, электронов), а бозоны (фотоны и пи-мезоны) как бы призваны передавать взаимодействие между ними. Является ли это случайным или мы здесь встречаемся с проявлением какой-то глубокой закономерности? Этот вопрос остается без ответа. В картине строения вещества только мю-мезоны остаются без работы. Какой смысл их существования? Ответ на этот вопрос также можно ожидать только в будущем.

Жизнь в мире элементарных частиц управляется законами сохранения. Наиболее общими являются законы сохранения энергии, импульса (количества движения), момента количества движения. Последний закон приводит к интересным следствиям. Он воспрещает превращение фермиона в бозон; согласно ему, бозон может быть «разменен» только на четное число фермионов. Если, например, сталкиваются бозон и фермион, то в результате превращения может получиться либо фермион и бозон, либо три фермиона, либо фермион и два бозона и т. д.

Столь же общим законом будет закон сохранения заряда. Во всех превращениях заряд всегда сохраняется. Согласно этому закону, нейтральные частицы могут образовывать заряженные частицы только парами с противоположным зарядом. Превращение фотонов в электронно-позитронные пары — пример действия закона сохранения заряда.

Опыт показывает, что, помимо перечисленных законов, существует закон сохранения числа ядерных частиц. Из названия этого закона можно было бы заключить, что в превращениях остается неизменным число протонов плюс число нейтронов. На самом деле этот закон означает, что в превращениях никогда не может изменяться разность

$$N = (\text{число протонов} + \text{число нейтронов}) - (\text{число антипротонов} + \text{число антинейтронов}).$$

Если античастиц нет, то отсюда следует сохранение числа ядерных частиц в буквальном смысле.

Рождение же протона или нейтрона возможно только в паре с античастицей. Мы не можем, например, надеяться, что столкновение очень быстрого позитрона с протоном может повлечь за собой появление двух протонов.

Число N называют также ядерным зарядом. Каждой ядерной частице — нейтрону или протону — приписывается ядерный заряд, равный $+1$, а каждой тяжелой античастице (антипротону или антинейтрону) приписывается ядерный заряд, равный -1. Закон сохранения числа ядерных частиц тогда превращается в закон сохранения ядерного заряда — ядерный заряд всех частиц в результате реакции не может измениться.

Значение понятия о ядерном заряде было в полной мере осознано лишь сравнительно недавно — после того, как были открыты странные частицы (см. гл. 5) и было введено понятие о барионном заряде. С помощью представления о ядерном заряде мы выясним сейчас важный вопрос: в чем заключается основное отличие ядерной частицы от ее античастицы?

Ранее (в гл. 2, «Частицы и античастицы»), говоря о позитроне и электроне, мы прежде всего подчеркивали их отличие по знаку электрического заряда. Когда обсуждался вопрос об антипротоне, то также в первую очередь отмечалось его отличие по знаку электрического заряда от протона. Но очевидно, что электрический заряд не может быть главным отличием ядерной частицы от ее античастицы, так как нейтрон электрически нейтрален, а между тем нейтрон и антинейтрон — разные частицы. Нейтрон отличается от антинейтрона по тем превращениям, в которых он может участвовать. Это отличие мы можем теперь уточнить: превращения нейтрона и антинейтрона различны потому, что ядерные заряды этих частиц отличаются по знаку. С другой стороны, оказывается, что магнитные моменты нейтральных частиц — нейтрона и антинейтрона — зависят от ядерного заряда. Поэтому именно различие в знаках ядерного заряда является основным отличием нейтрона от антинейтрона (а не противоположные знаки магнитных моментов).

Законы сохранения позволяют отобрать из всех мыслимых реакций те, которые возможны. Но согласие с законами сохранения само по себе еще не означает, конечно, что интересующее нас превращение действительно происходит. Превращения элементарных частиц — это следствие взаимодействия частиц. Благодаря электромагнитному взаимодействию между протонами при столкновении протонов могут образоваться фотоны. Благодаря же ядерному взаимодействию протонов (которое осуществляется посредством пи-мезонов) это же столкновение может сопровождаться рождением пи-мезонов.

Когда мы сравниваем два превращения, нас интересует, как часто они происходят и какое из них является более вероятным. Так, в случае столкновения протонов нас интересует, что будет более вероятным результатом столкновения — рождение фотона или рождение пи-мезона. Вероятность превращения зависит от величины взаимодействия. Чем сильнее взаимодействие, тем быстрее и чаще происходят превращения.

Наиболее сильное взаимодействие наблюдается между пи-мезонами, с одной стороны, и протонами и нейтронами — с другой. Это взаимодействие мы будем называть пимезонным, его характерное время — это ядерное время 10^{-23} *сек.* Большая величина этого взаимодействия влечет за собой большую величину ядерных сил и высокую частоту превращений, вызываемых пимезонным взаимодействием, по сравнению с превращениями другого типа. Так, например, при столкновении протонов картина явления определяется в основном пимезонным взаимодействием.

Следующим по силе является электромагнитное взаимодействие — взаимодействие между электромагнитным полем и заряженными частицами. Оно примерно в 100 раз слабее пимезонного. Так как заряды всех частиц одинаковы и равны либо $+1$, либо -1 (либо нулю), то электромагнитные взаимодействия всех заряженных элементарных частиц одинаковы.

В бета-распаде мы встретились с бета-взаимодействием (которое называют также взаимодействием Ферми), связывающим протон, нейтрон, электрон

и антинейтрино (или нейтрон, протон, позитрон и нейтрино) и вызывающим бета-распад:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}.$$

Бета-взаимодействие обладает интересными особенностями. Во-первых, оно связывает только фермионы, в то время как электромагнитное и пимезонное взаимодействия связывают фермионы с бозонами (электрон и фотон, протон или нейтрон и пи-мезон). Во-вторых, бета-взаимодействие очень слабо — оно примерно в 10^{-12} раз, т. е. в тысячу миллиардов раз, слабее электромагнитного (табл. 2).

Таблица 2

Взаимодействия элементарных частиц

Взаимодействие	Сравнительная величина	Характерные времена, *сек*
Пимезонное	1	10^{-23}
Электромагнитное	1/137	10^{-20}—10^{-21}
Слабое	10^{-14}	10^{-8}—10^{-9}

Известны также и другие слабые взаимодействия. Например, распад мю-мезона $\mu^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + \nu + \bar{\nu}$ является следствием особого взаимодействия, связывающего четыре лептона — $(\mu - e - \nu - \bar{\nu})$-взаимодействия. Другим примером служит распад пи-мезона на мю-мезон и нейтрино, который можно считать следствием другого взаимодействия — $(\pi - \mu - \nu)$-взаимодействия. При этом оказывается, что величины слабых взаимодействий приблизительно совпадают. Этот факт трудно приписать случайности, если учесть, что с ближайшим по силе электромагнитным взаимодействием слабые взаимодействия отделены множителем 10^{-12}. В чем же дело, почему все слабые взаимодействия почти совпадают по силе? Возможно, что причина заключается в нейтрино, которое присутствует во всех слабых взаимодействиях. Во всяком случае, проблема слабых взаимодействий — это одна

из интереснейших и загадочных проблем физики элементарных частиц.

Вопрос о слабых взаимодействиях осложняется дополнительным обстоятельством. Когда мы рассматриваем распад заряженного пи-мезона на мю-мезон и нейтрино, то совсем не обязательно вводить $(\pi - \mu - e)$-взаимодействие для объяснения распада. Распад заряженного пи-мезона можно объяснить и иначе, если только мы вспомним рассуждения в связи с распадом нейтрального пи-мезона (гл. 3, «Мю-мезоны и пи-мезоны»). В самом деле, положительный пи-мезон может виртуально распасться на пару протон — антинейтрон (что согласуется с законами сохранения электрического ядерного зарядов), а затем пара может аннигилировать с образованием мю-мезона и нейтрино: $\pi^+ \to p + \bar{n} \to \mu^+ + \nu$, если существует $(p - \bar{n} - \mu - \nu)$-взаимодействие. Таким образом, распад пи-мезона можно объяснить как с помощью предположения о прямом $(\pi - \mu - \nu)$-взаимодействии, так и с помощью предположения о существовании $(p - \bar{n} - \mu - \nu)$-взаимодействия. Какое же из этих объяснений соответствует истине?

В настоящее время значительное число экспериментальных данных заставляет склониться к мысли, что существует универсальное слабое взаимодействие. Одна из характерных черт этого взаимодействия (объяснение которых, вообще говоря, выходит за рамки настоящей книги) состоит в том, что оно связывает четыре фермиона. Этой чертой обладает $(p - \bar{n} - \mu - \nu)$-взаимодействие, на котором основывалось второе объяснение распада пи-мезона.

Зарядовая независимость и различия в массах

Что можно сказать о массах элементарных частиц? На современном уровне развития физика не рассматривает распределение масс между элементарными частицами. Мы не можем ответить, например, почему пи-мезоны имеют массы порядка 270,

а протоны и нейтроны — массы порядка 1840 электронных масс и т. д. Значения масс элементарных частиц не выводятся из современной теории; теория рассматривает массы как заданные величины, не подлежащие обсуждению. Имеется только один вопрос, касающийся масс, который обсуждается теоретической физикой. Этот вопрос можно сформулировать так: чем объясняется различие между массами протона и нейтрона и между массами заряженного и нейтрального пи-мезонов? Ответ на него связан с одним из фундаментальных представлений современной физики элементарных частиц — представлением о зарядовой независимости.

Возвратимся к ядерным силам и пимезонному взаимодействию. Мы видели, что между ядерными частицами могут действовать три типа сил: силы между нейтроном и протоном, силы между двумя протонами и силы между двумя нейтронами. Экспериментально установлено, что все три типа сил в точности равны. (Разумеется, силы нужно сравнивать для одинаковых состояний движения частиц.) Иначе говоря, ядерные силы не зависят от того, имеет ли частица заряд. Это свойство ядерных сил называется зарядовой независимостью.

Таким образом, по отношению к ядерным силам протон и нейтрон оказываются одинаковыми (если не обращать внимания на разницу в массах); различие между ними выявляется лишь благодаря заряду с помощью электромагнитного взаимодействия. Поэтому протон и нейтрон можно считать разными состояниями одной и той же частицы — нуклона («нуклон» означает «ядерная частица»). Если нуклон находится в состоянии с зарядом $+1$, то это протон, если заряд нуклона равен нулю, то это нейтрон. Нуклон обычно обозначается символом N. Разумеется, переход к иному наименованию той же частицы сам по себе не может дать чего-либо нового: к новым результатам приводит скрывающаяся за этим идея зарядовой независимости.

Первый важный вывод из зарядовой независимости ядерных сил следует для пи-мезонов. Так как

ядерные силы создаются путем «перекидывания» виртуальными пи-мезонами между нуклонами, то очевидно, что требование зарядовой независимости накладывает ограничения на характер взаимодействия пи-мезонов с нуклонами. Теоретические исследования показали, что ядерные силы будут зарядово независимыми, если взаимодействие нуклонов с нейтральными пи-мезонами вдвое меньше, чем с заряженными, а взаимодействие нуклонов с заряженными пи-мезонами одинаково для обоих знаков заряда — для π^- и π^+. Несмотря на кажущееся различие в отношении к нуклонам между π^0, с одной стороны, и π^+ и π^- — с другой, подробное исследование показывает, что как раз так и должно быть, чтобы пимезонное взаимодействие было также зарядово независимым. Например, энергии различных пи-мезонов π^0, π^-, π^+ при их взаимодействии с нуклонами (в одинаковых состояниях) не будут зависеть от знака заряда. Таким образом, зарядовая независимость ядерных сил влечет за собой зарядовую независимость для пи-мезонов. Если отвлечься от разницы в массах, то все три типа пимезонов можно также считать разными состояниями одной частицы.

Теперь мы подходим к нашему первоначальному вопросу о массах пи-мезонов и нуклонов. Здесь читателю придется призвать на помощь воображение. Предположим на минуту, что электромагнитного взаимодействия вообще не существует. Разумеется, это можно только вообразить, так как «истребить» электромагнитное взаимодействие невозможно — речь идет не о том, чтобы две частицы не взаимодействовали электрически друг с другом (например потому, что они далеки друг от друга), а о том, чтобы вообще не существовало и понятия электромагнетизма. Иначе говоря, рассмотрим упрощенную модель, когда весь мир элементарных частиц состоит из протона, нейтрона и пи-мезонов и когда об электромагнитном взаимодействии никто не знает. Тогда единственным видом взаимодействия будет пимезонное (и вытекающие из него ядерные силы), и маленький мирок этих частиц будет зарядово незави-

симым. Что можно было бы сказать о массах нейтрона, протона и пи-мезонов в таком мирке? Очевидно, что в зарядово независимом мирке и все энергии и все массы также будут зарядово независимыми. А это значит, что здесь масса нейтрона должна быть равна массе протона и что массы всех пи-мезонов должны быть одинаковыми.

До сих пор мы как бы забыли об антипротоне и антинейтроне. Их легко включить в общую схему, так

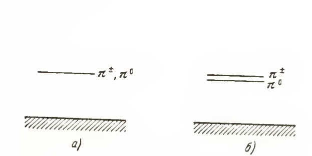


Рис. 23. Массы пи-мезонов и нуклонов: *а* — при гипотетическом отсутствии электромагнитного взаимодействия; *б* — в его присутствии.

как масса античастицы всегда равна массе частицы. Итак, в упрощенной модели имеются только две массы — масса нуклона и масса пи-мезона (рис. 23,*а*).

«Введем» теперь электромагнетизм. К прежним зарядово независимым силам прибавятся зависящие от заряда электрические силы. Энергия заряженных частиц теперь будет отлична от энергии нейтральных частиц. Следовательно, и массы покоя заряженных частиц не могут совпадать с массой нейтральной частицы. Так как электромагнитное взаимодействие значительно меньше пимезонного, то изменение масс должно быть невелико: введение электромагнетизма вносит только поправки в упрощенную модель. Двойной уровень «нейтрон — протон» расщепляется

на два близких уровня — протон и нейтрон; вместо одной общей массы у пи-мезонов будет две близкие массы — масса заряженных мезонов и масса нейтрального мезона (рис. 23, *б*).

Таким образом, различие в массах между заряженными мезонами и нейтральным мезоном и между нейтроном и протоном имеет электромагнитное происхождение. Масса частицы состоит как бы из основной, затравочной частицы и небольшой части Δm электромагнитной природы. Любопытно, что эта электромагнитная часть может быть как положительной, так и отрицательной. У пи-мезонов масса нейтрального мезона меньше массы заряженных мезонов на 9 электронных масс и положительна, а в нуклоне масса нейтрона больше массы протона на 2,5 электронной массы и отрицательна. Разности масс невелики: для пи-мезонов она составляет 3%, а для нуклона всего 0,14%. Теоретические расчеты подтвердили идею об электромагнитной природе различия в массах.

В атомной физике при изучении атомных спектров приходится часто встречаться с положением, когда группа состояний атома имеет почти одинаковую энергию. Если в группе всего два состояния, то говорят о дублете; группу из трех состояний называют триплетом; в общем случае такая группа носит название мультиплета. По аналогии можем сказать, что нуклон представляет собой дублет из протона и нейтрона, а пи-мезоны составляют триплет π^0—π^+—π^-. Поскольку все члены этих мультиплетов имеют почти одинаковую массу и отличаются только по заряду, то мы будем говорить о них как о зарядовых мультиплетах.

Изотопический спин

Идея о зарядовой независимости как принципиальном свойстве сильного взаимодействия оказалась плодотворной и в других отношениях. При математическом развитии этой идеи была введена новая

физическая величина — изотопический спин. Представление об изотопическом спине было с пользой применено в теории пи-мезонов и нуклонов, но особенно оно пригодилось, когда наступил «мезонный хаос» (см. гл. 5). Представление об изотопическом спине помогло разобраться в новых мезонах, после чего нельзя уже сомневаться в фундаментальном характере этой величины. Описание изотопического спина будет поэтому одновременно и вступлением к рассказу о «странных» частицах.

Что же такое изотопический спин? Это понятие было введено еще 25 лет тому назад Гейзенбергом при описании ядерных сил.

Во избежание недоразумений отметим, что прилагательное «изотопический» не означает, что изотопический спин характеризует каким-то образом изотопы. Что касается слова «спин», то оно появилось потому, что математика изотопического спина оказалась такой же, что и математика обычного спина. Другого сходства между обоими спинами нет.

Изотопический спин — это довольно абстрактное понятие, и для того чтобы его описать, воспользуемся, во-первых, нашим прежним представлением зарядовой независимости (см. рис. 23) и, во-вторых, аналогией с обычным спином. Раньше в качестве основных величин, характеризующих элементарную частицу, мы перечисляли массу, спин, заряд и время жизни. Но у нуклона и пи-мезонов имеется еще одно свойство: и пи-мезоны и нуклоны образуют зарядовые семейства, причем в отсутствии электромагнетизма все члены каждого семейства равноправны (рис. 23, a). Возникает вопрос: как характеризовать зарядовые свойства?

Семейство как целое мы можем описать числом членов в семействе, т. е. числом зарядовых состояний в мультиплете. Число членов в зарядовом семействе характеризуется изотопическим спином I: оно равно $2I + 1$. Нуклон представляет собой семейство из двух частиц: протона и нейтрона — поэтому изотопический спин нуклона равен половине. В семействе пи-мезо-

нов три частицы: π^0, π^+ и π^- — и изотопический спин пи-мезона равен единице.

Изотопический спин — это характеристика всего зарядового семейства. Кроме того, нам нужна еще величина, характеризующая каждый член семейства в отдельности. Одна частица в зарядовом семействе отличается от другой по заряду, при этом заряды частиц следуют через единицу. Поэтому можно было бы выбрать в качестве такой величины заряд. Но с точки зрения теории удобнее характеризовать отдельный член не зарядом, а другой величиной I_z, которая выражается через заряд. Для пи-мезонов I_z равно заряду: нейтральному мезону приписывается $I = 0$, положительному — $I_z = 1$, а отрицательному — $I_z = -1$. У нуклона величина I_z связана с зарядом простым соотношением:

$$\text{заряд} = \frac{1}{2} + I_z,$$

так что нейтральному нейтрону приписывается $I_z = -\frac{1}{2}$, а положительному протону $I_z = \frac{1}{2}$. Легко заметить, что среднее значение I_z для каждого зарядового семейства равно нулю. Величина I_z называется z-й составляющей изотопического спина. Удобство такого описания зарядовых семейств состоит в том, что I и I_z связаны с одной и той же величиной — «вектором» изотопического спина $\boldsymbol{I}$: величина I_z есть «проекция $\boldsymbol{I}$ на ось z», а изотопический спин есть абсолютная величина «вектора» $\boldsymbol{I}$. Мы не случайно взяли в кавычки слова «вектор» и «проекция на ось z» в предыдущей фразе. Дело в том, что «ось z» это не есть какое-то направление в нашем пространстве, так же как и $\boldsymbol{I}$ не есть вектор в пространстве, где мы живем. Эти названия отражают математическую аналогию между свойствами изотопического спина и свойствами вектора спина, описывающего собственное вращение элементарной частицы.

Действительно, мы представляли себе частицу со спином в виде волчка. Весьма важным при этом была «квантованность» направлений оси волчка — ось

волчка могла занимать не любые положения, а только несколько определенных (рис. 10). Для частицы со спином $s = \frac{1}{2}$ таких положений было только два: либо вдоль магнитного поля, либо против поля. В первом случае проекция спина $s_z = \frac{1}{2}$, а во втором $s_z = -\frac{1}{2}$. У частицы со спином $s = 1$ возможны три направления, так что проекции s_z для этих направлений равны $s_z = -1, 0, +1$. И точно такие же свойства мы только что установили для величин I и I_z: при заданном I возможны $2I + 1$ различных значений «проекции» I_z, отличающихся друг от друга на единицу так, что среднее I_z равно нулю. Но для обычного спина разные ориентации оси волчка вполне реальны, и ось z — это одно из направлений в нашем пространстве, например направление магнитного поля. Величины же изотопического спина I и I_z введены для описания зарядовых семейств и не имеют ничего общего с обычным спином s, кроме формальной аналогии, а значок «z» при I_z мы пишем только потому, что у проекции обычного спина также пишут z.

Итак, зарядовое семейство элементарных частиц в целом характеризуется изотопическим спином, а отдельные члены семейства, входящие в его состав частицы, отличаются по «проекции» изотопического спина I_z. С помощью изотопического спина очень удобно сформулировать те особенности превращений элементарных частиц, которые следуют из зарядовой независимости взаимодействия. Оказывается, что зарядовая независимость равносильна новому закону сохранения — закону сохранения изотопического спина. По этому закону полный изотопический спин всех частиц и его проекция не меняются в результате реакций. Но закон сохранения изотопического спина не столь общ, как закон сохранения энергии или заряда; он выполняется только для превращений, вызываемых зарядово независимыми взаимодействиями. Из всех известных нам пока взаимодействий (см. табл. 2) только пимезонное зарядово независимо. И при

электромагнитных взаимодействиях и в слабых взаимодействиях изотопический спин не сохраняется — в этих взаимодействиях силы между частицами зависят от того, есть ли у них заряд. По этой причине электрону, позитрону, мю-мезонам и фотонам не имеет смысла приписывать какой-либо изотопический спин — ведь эти частицы не участвуют в зарядово независимых взаимодействиях.

ГЛАВА 5

СТРАННЫЕ ЧАСТИЦЫ

С 1946—1947 гг. физики перешли в новое наступление на космические лучи. К этому наступлению они хорошо подготовились и начали его, обладая усовершенствованными методами эксперимента. Толстослойные пластинки с улучшенными эмульсиями и камера Вильсона, масс-спектрометр и тончайшая методика изучения следов и многое другое использовалось для улавливания и определения космических частиц. Камеру Вильсона и пластинки помещали на уровне моря и поднимали в горы, космические частицы ловили с помощью шаров-зондов и ракет. Усилия ученых были вознаграждены — они стали обнаруживать новые частицы и притом в большом количестве. Началось буквально нашествие элементарных частиц.

Нашествие элементарных частиц

Уже в тот же год, когда был открыт пи-мезон, английским физикам Батлеру и Рочестеру удалось сфотографировать распад неизвестной частицы. След самой частицы не был виден, что указывало на отсутствие у нее заряда, а следы двух частиц (продуктов распада) образовывали вилку в виде буквы V. Поэтому неизвестная нейтральная частица была названа вначале V^0-частицей. На рис. 24 представлена фотография распада V^0-частицы в камере Вильсона. Изучение вилки привело Батлера и Рочестера к убеж-

дению, что продуктами распада могут быть пи-мезоны и мю-мезоны. Подсчет кинетической энергии позволил оценить массу V^0-частицы примерно в 1000 электронных масс.



Рис. 24. Распад нейтральной V^0-частицы в камере Вильсона.

Буквами *e* и *f* отмечены следы заряженных частиц, образовавшихся при распаде.

На другой фотографии, полученной Батлером и Рочестером, также видна V-образная вилка, но с тупым углом между следами, причем одна из частиц двигалась к центру вилки (рис. 25). Это было истолковано как распад неизвестной заряженной частицы на одну заряженную частицу и одну или несколько нейтральных.

В течение последующих трех-четырех лет было получено много фотографий *V*-частиц. Это потребовало большой работы. Для того чтобы «увидеть» один необычный распад, нужно было сфотографировать до тысячи различных превращений, вызываемых космическими лучами. Общее же число снимков, сделанных

в поисках новых частиц, за эти годы превысило 100 000. В результате было установлено, что существует два типа нейтральных частиц, дающих V-образные вилки при распаде. Вторая V^0-частица должна была иметь

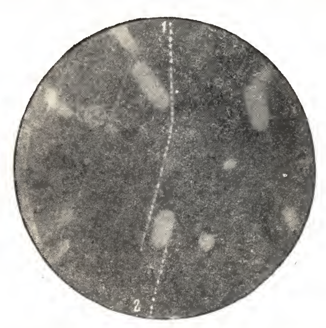


Рис. 25. Распад отрицательной *V*-частицы (след *1*) на одну заряженную (след *2*) и нейтральную частицы.

массу, близкую к 2200 электронным массам, что превосходило массу нейтрона. Это было непредвиденным обстоятельством — ранее предполагалось, что не может быть элементарных частиц тяжелее нейтрона. Фотографии заряженных частиц попадались значительно реже — один снимок на 5—6 снимков распада нейтральных частиц.

В физике элементарных частиц наступила страдная пора. Стремясь установить свойства *V*-частиц, ученые делали все новые и новые опыты с помощью различ-

ных методов и наталкивались на новые частицы. Число открываемых частиц стало расти катастрофически быстро. Часть открытых частиц оказалась порождением погрешностей эксперимента, но большое число частиц держалось упорно. Для обозначения новых частиц был использован греческий алфавит. Появились мезоны $\zeta^{\pm}$, $\varkappa^{\pm}$, $\tau^{\pm}$, τ^0 $\chi^{\pm}$, $\theta^{\pm}$, θ^0, отличающиеся друг от друга массами, схемами распада и временами жизни. Набор масс этих частиц включал значения 550, 900, 950, 965 и 1000 электронных масс. Другую группу составляли частицы с массой, бóльшей массы нейтрона и меньшей массы дейтона (т. е. примерно удвоенной массы нейтрона), которые получили название гиперонов.

По мере накопления экспериментальных сведений массы частиц исправлялись, времена жизни уточнялись, стало возможным определить спин частиц. Выяснилось, что частиц с массой 550 (ζ-мезоны) не существует. Уточнение масс остальных частиц сдвинуло мезонные массы к 965, а времена жизни всех заряженных мезонов оказались приблизительно одинаковыми. Число новых нейтральных мезонов сократилось до одного. Поскольку массы всех новых заряженных мезонов совпали, то было естественно предположить, что все заряженные мезоны в действительности сводятся только к двум частицам — положительной и отрицательной. Правда, при этом возникала трудность, связанная с тем, что каждый из мезонов τ, θ, $\varkappa$, χ имел собственную схему распада. Однако эту трудность можно было обойти, допустив, что мезон может иметь несколько схем распада.

В результате опытов выявилась следующая картина свойств новых элементарных частиц, существование которых установлено достоверно. Все новые частицы подразделяются на две группы по массе и по спину (т. е. по типу статистики).

Первую группу составляют частицы с массой около 965 электронных масс. Они называются теперь K-частицами, или K-мезонами, и являются бозонами, т. е. в этом отношении они подобны пи-мезонам. K-мезоны, заменившие собой множество τ-, θ-, $\varkappa$-, χ-мезонов,

встречаются в виде положительной, отрицательной и нейтральной разновидностей. Масса заряженных K-мезонов несколько больше — на 1,5 электронной массы, чем масса нейтральных K-мезонов. Нейтральный K-мезон — это первая V^0-частица, которая была открыта Батлером и Рочестером. Все K-частицы неустойчивы. Заряженные K-частицы живут в среднем $1{,}2 \cdot 10^{-8}$ *сек*, т. е. примерно одну стомиллионную долю секунды.

Распады K-частиц представляют исключительно интересную головоломку. Рассмотрим в качестве примера положительный K-мезон. Чаще всего наблюдается распад этой частицы на мю-мезон и нейтрино:

$$K^+ \to \mu^+ + \nu.$$

Кроме того, довольно часто при распаде положительного мезона с той же массой, что и у K^+-мезона, появляются два пи-мезона.

Есть ли это другой распад K-мезона

$$K^+ \to \pi^+ + \pi^0$$

или так распадается другая частица, отличная от K-мезона? Уже совпадение масс распадающихся мезонов и целочисленный спин обоих мезонов делают весьма вероятной их тождественность. Но измерения показывают, что и времена жизни при обоих типах распада также одинаковы. Когда же сравнили частоту обоих способов распада, то оказалось, что распад на мю-мезон встречается всегда примерно в два раза чаще, чем распад на два пи-мезона, причем это отношение не зависит от способа рождения K-мезонов. Это убедило, что различные возможности распада свойственны одной и той же частице K^+, а не разным частицам. Помимо написанных выше схем распада, известны еще другие, более редкие пути распада K^+, из которых наиболее важен распад K^+ на три пи-мезона

$$K^+ \to \begin{cases} \pi^+ + \pi^+ + \pi^-, \\ \pi^+ + \pi^0 + \pi^0; \end{cases} \quad K^+ \to \begin{cases} \pi^0 + \mu^+ + \nu, \\ \pi^0 + e^+ + \nu. \end{cases}$$

Фотография трехмезонного распада K^+-частицы приведена на рис. 26.

Различные распады, или вернее, сосуществование распадов на два пи-мезона и три пи-мезона и является первой загадкой *К*-частиц. В квантовой физике существует закон сохранения четности, о котором будем говорить в следующей главе. Согласно этому закону, частица, распадающаяся на два пи-мезона, не может

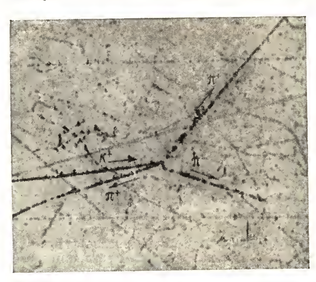


Рис. 26. Распад положительного *К*-мезона на три пи-мезона в пузырьковой камере.

распадаться на три пи-мезона. В связи с этим считалось, что на два пи-мезона распадается одна *К*-частица, а на три пи-мезона — другая *К*-частица. Эти частицы обозначались буквами θ (тета) и τ (тау), а вся трудность известна как загадка «тау — тета». Предвосхищая соображения о несохранении четности, будем считать θ и τ тождественными частицами.

Вторую группу новых частиц образуют гипероны с массами, расположенными в интервале от 2180 до 2600 электронных масс. Все гипероны имеют спин, равный половине, и подобно нейтрону и протону являются тяжелыми фермионами. Но сходство между

гиперонами и нуклонами не ограничивается этим; имеются некоторые основания полагать, что и нуклоны и гипероны являются родственными частицами, и их обычно объединяют общим названием «барионов» (что означает «тяжелые частицы»). Выражение родства между различными барионами можно видеть и в законе сохранения барионов, который гласит, что разность

(число барионов) — (число антибарионов)

никогда не изменяется в результате превращений. Закон сохранения числа барионов теперь заменяет прежний закон сохранения числа ядерных частиц. Согласно этому закону, например, если у нас до превращения был протон, то после любого превращения должен обязательно присутствовать один барион, т. е. либо протон, либо нейтрон, либо один из гиперонов. Теоретики считают закон сохранения барионов столь же точным, как и закон сохранения заряда, и известные нам опыты подтверждают это мнение.

Гипероны нестабильны; их время жизни несколько меньше времени жизни K-мезонов и составляет около одной десятимиллиардной доли секунды (10^{-10} *сек*). При распаде гиперонов всегда появляется либо нуклон, либо другой гиперон в согласии с законом сохранения барионов. В эксперименте были открыты четыре гиперона: нейтральный гиперон Λ (ламбда) с массой в 2181 электронную массу, положительный и отрицательный гипероны $\Sigma^{\pm}$ (сигма) с массами в 2325 и 2341 электронную массу и отрицательный гиперон Ξ^{-} (кси) с массой в 2585 электронных масс. Кроме того, как мы увидим дальше, еще один гиперон был сперва предсказан теорией, а затем обнаружен на опыте. Гиперон «кси» называют также каскадным гипероном, так как он (единственный среди гиперонов) распадается на другой гиперон (ламбда) и пи-мезон:

$$\Xi^{-} \rightarrow \Lambda + \pi^{-}.$$

С гипероном «ламбда» мы уже знакомы: «ламбда» — это иное наименование второй V^0-частицы Батлера и Рочестера.

Странные частицы

Итак, в 1952—1953 гг. физики столкнулись с фактом существования по меньшей мере семи новых частиц. Положение усложнялось еще тем обстоятельством, что новые частицы вели себя чрезвычайно странно.

Трудности в истолковании опытных данных встретились вскоре после первых экспериментов с новыми частицами. Эти трудности были связаны со странным поведением новых частиц при рождении и распаде. На рис. 27 можно видеть рождение и распад Λ и K^0.

Гипероны и K-мезоны легко рождались при столкновениях пи-мезонов с протонами. Такие реакции наблюдались часто в космотроне — мощном ускорителе протонов, работающем в Брукхавене (США), с наибольшей энергией протонов в 3 млрд. *эв.* Этот ускоритель, вступивший в строй в 1953 г., доставил много сведений о странных частицах. В этом ускорителе быстрые протоны использовались для создания пучка быстрых пи-мезонов (см. рис. 20, где представлена схема образования искусственных пи-мезонов); затем пи-мезоны направлялись на мишень, и в столкновении с протонами мишени происходило образование гиперонов и K-мезонов, например (рис. 27):

$$\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda.$$

Подобные превращения наблюдались часто при энергии, исчисляемой миллиардами электрон-вольт, и это указывало на сильное взаимодействие такого же порядка величины, что и ядерное. С другой стороны, при распаде гиперона ламбда также появлялись протон и пи-мезон или нейтрон и пи-мезон

$$\Lambda \rightarrow \pi^- + p \quad \text{или} \quad \Lambda \rightarrow n + \pi^0$$

(см. фотографию распада на рис. 25). Так как и распад и рождение гиперона ламбда были связаны с

пи-мезонами и нуклонами, то следовало ожидать, что распад должен происходить быстро, и время распада будет того же порядка величины, что и время рождения. Но в действительности распад происходил очень медленно: время распада Λ примерно $3 \cdot 10^{-10}$ *сек*, а время рождения того же порядка, что

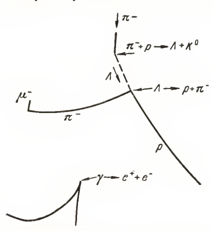


Рис. 27. Схема совместного рождения гиперона ламбда Λ^0 и мезона K^0 и последующего распада Λ^0 в пузырьковой камере.

и ядерное время, т. е. 10^{-23} *сек*. Столь большое различие не могло быть случайным; оно казалось необъяснимым: почему рождение новых частиц при столкновении протонов и пи-мезонов происходит быстро, а распад на пи-мезоны и протоны оказывается медленным?

К первой загадке рождения и распада присоединилась вторая — новые частицы рождались только парами. Ни в одном из опытов не удавалось обнаружить рождение какой-нибудь одной новой частицы (либо K-мезона, либо гиперона), они всегда образовывались совместно. Например, столкновение пи-мезона и протона приводило к появлению и K^0 и Λ. Между тем из самых различных соображений — и по

необходимой энергии, и с точки зрения остальных законов сохранения — вытекало, что одиночное рождение новой частицы должно быть более легким, чем образование сразу двух частиц. Новые частицы (гипероны и K-мезоны) оказались поистине странными частицами, и это название закрепилось за ними.

Как это часто бывает, вторая загадка содержала в себе ключ к первой загадке. Совместное (и только совместное!) рождение странных частиц можно было истолковать как результат запрета одиночного рождения странной частицы. Каковы бы ни были причины запрета, с его помощью объяснялась удивительная стойкость странных частиц по отношению к распаду. Согласно принципу обратимости, каждой реакции всегда соответствует обратная реакция. Поэтому если невозможно одиночное рождение странной частицы при соударении протонов и пи-мезонов, то должен быть запрещен и распад отдельной странной частицы на протон и пи-мезон. Наблюдаемый медленный распад странных частиц приписывался тогда тому, что запрет одиночного рождения не абсолютен и относится только к сильным взаимодействиям, не касаясь слабых взаимодействий, которые и вызывали распад. Такое представление поддерживается и сопоставлением времен образования распада странных частиц: как мы видели, эти времена отличаются примерно в 10^{13} раз. Это число совпадает по порядку величины с отношением сильного и слабого взаимодействий (см., например, табл. 2 на стр. 118).

Но каковы же причины запрета? Какое правило допускало только совместное образование странных частиц? Этот запрет не следовал из известных законов сохранения, и можно было думать, что здесь действует какой-то новый закон сохранения, связанный с неизвестным свойством странных частиц. Требовалось выявить это свойство, отличающее странные частицы от обычных частиц. Для этого было необходимо рассмотреть всю совокупность странных частиц по сравнению с обычными частицами. Иначе говоря, нужно было начинать с попыток включить странные частицы в общую классификацию частиц.

Классификация странных частиц

Классификация — это первый шаг при построении науки, имеющей дело со множеством явлений. Во многих случаях сама возможность классификации весьма важна, а классификация приводит к открытиям. Вспомним, например, какую большую роль сыграла для зоологии классификация Линнея. Другой пример решающего влияния классификации — периодическая система Менделеева. Из истории науки мы знаем, что классификация не только приводит в систему разрозненные сведения, но и таит в себе возможность предсказаний. Примером опять может служить периодическая система Менделеева. После ее построения остались пустые клеточки — классификация указывала на то, что еще неизвестно, но должно существовать. И действительно, эти клеточки впоследствии были заполнены недостающими химическими элементами, найденными в блестящем согласии с предсказанием Д. И. Менделеева.

Основой классификации является выбор признака, по которому систематизируются предметы. С замечательной прозорливостью Д. И. Менделеев выбрал в качестве главного признака атомный вес, и это было залогом его успеха. Ранее мы классифицировали элементарные частицы по их массе, спину и электрическому заряду. С помощью этой классификации мы могли понимать все реакции с обычными (нестранными) частицами. Для странных частиц задания массы, спина и заряда уже недостаточно для того, чтобы можно было понимать их превращения. В этом мы убедились на примере противоречия между быстрым рождением частиц и их медленным распадом. Что же выбрать в качестве руководящего признака при классификации странных частиц?

Чтобы найти путь к отысканию этого признака, рассмотрим с несколько иной точки зрения непонятное поведение странных частиц. Необъяснимое совместное рождение странных частиц вызывается сильным взаимодействием; такой вывод несомненен, поскольку странные частицы рождаются часто. Вот этот

факт — большую величину взаимодействия — и можно выбрать в качестве исходного при построении классификации.

Можно предположить, что свойства странных частиц связаны прежде всего со свойствами сильного взаимодействия между гиперонами, K-мезонами и нуклонами, которое напоминает знакомое пимезонное взаимодействие. Действительно, в обоих случаях взаимодействие связывает фермионы с бозонами, в обоих случаях и фермионы и бозоны могут быть как заряженными, так и нейтральными; оба взаимодействия не являются электромагнитными и близки по величине. И вот возникла мысль, что зарядовая независимость присуща не только пимезонному, но и K-мезонно-гиперонному взаимодействию. Эта гипотеза выдвигала зарядовую независимость на положение одного из руководящих принципов физики элементарных частиц. Ведь предполагалось, что около двух десятков частиц находится в сфере его влияния.

Что же означает зарядовая независимость для странных частиц? Как мы видели в гл. 4, для пимезонов и нуклонов зарядовая независимость проявляется в мультиплетности: нуклон представляет собой зарядовый дублет, а пи-мезоны — зарядовый триплет. Это же обстоятельство выражается математически тем, что нуклон и пи-мезон обладают изотопическим спином I, причем $I = \frac{1}{2}$ для нуклона и $I = 1$ для пи-мезона. Все реакции между нуклонами и пи-мезонами зарядово независимы, или, иначе говоря, во всех превращениях с пимезонным взаимодействием сохраняется полный изотопический спин I и его проекция I_z.

Таким образом, если распространим понятие о зарядовой независимости на странные частицы, то тем самым предположим, что они могут встречаться в виде зарядовых мультиплетов (зарядовых семейств) и что они обладают изотопическим спином. Если сравнить массы и заряды странных частиц, то, действительно, странные частицы можно разбить на зарядовые семейства.

В табл. 3 приведены массы тех странных частиц, которые были известны к моменту построения классификации странных частиц. Напомним, что массы частиц в семействе могут лишь немного отличаться друг от друга (например, из-за электромагнитного взаимодействия, которое различно для нейтральных и заряженных членов семейств).

Таблица 3

К классификации странных частиц

Частица	Символ	Заряд		
		+1	0	−1
K-мезоны	$K^{\pm}$, K^0	966,5	965,0	966,5
Гиперон лямбда	Λ	—	2181	—
Гипероны сигма	$\Sigma^{\pm}$	2325	—	2341
Гиперон кси	Ξ^{-}	—	—	2585

Из таблицы явствует, что K-мезоны образуют одно зарядовое семейство, а гипероны сигма Σ^+ и Σ^- — это члены другого семейства. Хуже обстоит дело с гиперонами кси и лямбда, так как у них, как будто, нет соответствующей пары по мультиплету. Ясно, что Λ не может принадлежать к тому же зарядовому семейству, что и Σ, так как слишком велико различие в массах, которое превышает 140 электронных масс, что составляет более 6%. Однако это не противоречит мультиплетности странных частиц, так как, во-первых, «семья» может состоять из одного члена, и, во-вторых, не все члены зарядового семейства могут быть нам известны.

Далее нам нужно решить, сколько частиц должно насчитываться в каждом зарядовом семействе. Это равносильно задаче о том, какой изотопический спин I нужно приписать зарядовому семейству, так как число частиц в зарядовом семействе равно $2I+1$. Значит, если в зарядовом семействе всего одна частица, то для нее $I = 0$, если две частицы, то $I = \frac{1}{2}$,

а если три частицы, то $I = 1$. При этом ближайшие члены семейства должны отличаться друг от друга на единицу заряда. С помощью этих сведений можно распределить все странные частицы по зарядовым семействам.

Начнем с гиперона лямбда. Одинок ли он или мы еще не нашли других членов его семейства? Этот гиперон сравнительно хорошо изучен, и можно думать, что Λ, действительно, «одинокая» частица. Но тогда ее изотопический спин должен быть равен нулю. Далее идут два гиперона сигма — положительный и отрицательный. Они бесспорно принадлежат к одному и тому же семейству. Но есть ли кроме них еще неизвестный член семейства или все семейство только эти две частицы? Заряды Σ^- и Σ^+ отличаются на две единицы, а это может быть только в семействе из трех частиц, где заряды равны $+1$, -1 и 0. Итак, если Σ^- и Σ^+ — представители семейства гиперонов сигма, то помимо них должен существовать еще один член семейства — нейтральный гиперон сигма (Σ^0). Предсказание нейтрального гиперона сигма было первым достижением классификации по изотопическому спину. Вскоре после предсказания теории нейтральный гиперон сигма был обнаружен экспериментально.

При применении этого же метода к каскадному гиперону кси возникло затруднение такого же рода, что и в случае гиперона лямбда. В опытах было твердо установлено существование только отрицательного гиперона кси (Ξ^-); поиски положительного гиперона кси результатов не дали. По-видимому, гиперона Ξ^+ нет. Но вполне возможно, что в семействе гиперонов кси имеется еще нейтральный гиперон (Ξ^0), который трудно обнаружить из-за отсутствия заряда и малого времени жизни. Мы сталкиваемся тогда с двумя возможностями для семейства каскадных гиперонов кси: либо оно состоит из единственного гиперона Ξ^-, либо оно содержит две частицы, и тогда экспериментаторы должны искать нейтральный гиперон кси. В первом случае изотопический спин гиперона кси был бы равен нулю, а во втором случае изотопический

спин гиперона кси равен половине. Оказалось, что во втором случае удается лучше описать экспериментальные данные, и гиперону кси было приписано $I=\frac{1}{2}$. Опыт указывает на второй вариант: в 1960 г. был зарегистрирован один случай распада нейтрального каскадного гиперона с массой в 2570 электронных масс.

На первый взгляд изотопический спин семейства K-частиц определить нетрудно: достаточно взглянуть на табл. 3, где видны три члена зарядового семейства K-частиц. Казалось бы, что изотопический спин K-мезонов должен быть равен $I = 1$. Однако это не так. При превращениях K-мезоны не ведут себя как частицы с $I = 1$. Такому предположению противоречит хорошо знакомая реакция образования гиперона ламбда и K^0-мезона. Рассмотрим ее вновь и подсчитаем проекции

$$\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda$$

изотопического спина I_z в обеих сторонах реакции. По гипотезе зарядовой независимости суммарная проекция I_z для левой части $\pi^- + p$ должна быть равна суммарному I для правой стороны $K^0 + \Lambda$. Для пи-мезона π^- $I_z = -1$, а для протона $I_z = \frac{1}{2}$, так что суммарное I_z для левой стороны равно $-\frac{1}{2}$. Из частиц в правой части известен только изотопический спин для Λ — он равен нулю, и поэтому проекция I_z для Λ также равна нулю. Отсюда следует, что для K^0-мезона проекция $I_z = -\frac{1}{2}$, а изотопический спин $I = \frac{1}{2}$.

Мы пришли к выводу, что изотопический спин K-мезонов должен быть равен половине. Но как же это можно совместить с действительностью? Ведь в мультиплете K-мезонов имеется три частицы, а не две, как это следует при $I = \frac{1}{2}$. Решение этой трудности таково: должно быть не три K-мезона, а четы-

ре — положительный, отрицательный и два нейтральных. Эти четыре частицы объединяются в два дублета. Мезоны K^+ и K^0 образуют один дублет, а второй дублет составляется из мезона K^- и второго нейтрального K-мезона, который обозначается $\overline{K}^0$. Дублет K^-, $\overline{K}^0$ — это дублет античастиц по отношению к дублету K^+, K^0.

Но предположение о двух нейтральных K-мезонах еще не решало полностью проблемы — нужно было показать, что K^0 и $\overline{K}^0$ являются различными частицами. Теория выяснила и это обстоятельство. Будем называть K^0-мезоном тот нейтральный K-мезон, который образуется вместе с гипероном ламбда при столкновении отрицательного пи-мезона с протоном

$$\bar{\pi} + p \rightarrow K^0 + \Lambda.$$

Для другого мезона $\overline{K}^0$ такой путь рождения воспрещен. Но зато мезон $\overline{K}^0$ при соударении с протоном может привести к реакции

$$\overline{K}^0 + p \rightarrow \pi^+ + \Lambda,$$

где образуются пи-мезон и гиперон ламбда. Для K^0-мезона такая реакция невозможна.

Когда же теоретики изучили более подробно свойства мезонов K^0 и $\overline{K}^0$, то они пришли к удивительным выводам. Оказывается, что оба мезона ведут себя как отдельные частицы только при рождении. Если же мезон K^0 (или $\overline{K}^0$) движется свободно, то он ведет себя как смесь других нейтральных частиц K_1^0 и K_2^0. Нейтральные частицы K_1^0 и K_2^0 отличаются друг от друга тем, что они по-разному распадаются и имеют разные времена жизни. Мезон K_1^0 распадается быстро, за 10^{-10} *сек*, на два пи-мезона

$$K_1^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$$

(ранее этот распад приписывался ошибочно K^0-мезону). Для частицы K_2^0 такой путь распада закрыт,

но зато она может распадаться на пи-мезон, мю-мезон и нейтрино, или на пи-мезон, электрон и нейтрино, или на три пи-мезона

$$K_2^0 \to \begin{cases} \pi^{\pm} + e^{\mp} + \nu; \\ \pi^{\pm} + \mu^{\mp} + \nu; \\ \pi^{+} + \pi^{-} + \pi^{0}. \end{cases}$$

Распад мезона K_2^0 должен идти значительно медленнее, чем распад мезона K_1^0.

Но удивительные свойства нейтральных K-частиц этим не ограничиваются. В свою очередь K_1^0-мезон (или K_2^0-мезон) при столкновении с ядрами ведет себя как смесь K^0- и $\overline{K}^0$-мезонов.

Как же будут проявляться на опыте столь необыкновенные свойства нейтральных K-мезонов? Проследим мысленно за судьбой K^0-мезонов, образовавшихся при столкновении пи-мезонов с протонами

$$\pi^- + p \to K^0 + \Lambda.$$

Пусть поток отрицательных пи-мезонов падает слева на тонкую перегородку, за которой находится

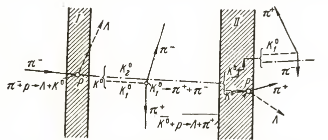


Рис. 28. Схема рождения и распада нейтральных K-мезонов.

вакуум (рис. 28). При соударении пи-мезона с протоном перегородки I образуются K^0 и Λ. Когда K^0-мезон начинает странствовать в вакууме, он представляет собой смесь K_1^0 и K_2^0, но здесь начинается

быстрый распад K_1^0 на пи-мезоны. Через несколько сантиметров пути K_1^0 — часть первоначальных мезонов K^0 — исчезает, и остаются лишь K_2^0-мезоны. Если перегородка *II* находится дальше, то к ней подходят только мезоны K_2^0. Это можно обнаружить по тому, что перед второй перегородкой уже нет распадов на π^+ и π^-, свойственных K_1^0-мезонам.

Что же произойдет при столкновении с протонами второй перегородки? Здесь нужно вспомнить, что при встречах с ядрами мезон K_2^0 ведет себя как смесь K^0 и $\overline{K}^0$, так что с перегородкой *II* будут взаимодействовать как мезон K^0, так и мезон $\overline{K}^0$. Это само по себе замечательно: ведь в первой перегородке рождались только мезоны K^0! Поскольку мезон K^0 при столкновении с ядром может только рассеиваться, то новых превращений встречи K^0 и ядра не вызывают. Другое дело с $\overline{K}^0$. При соударении протон и $\overline{K}^0$ могут превратиться в гиперон лямбда и пи-мезон. Благодаря этому превращению некоторая часть $\overline{K}^0$ исчезнет во второй перегородке.

Итак, после второй перегородки у нас будет попрежнему смесь мезонов K^0 и $\overline{K}^0$, но уже не в том соотношении, в каком она «составляет» K_2^0-мезоны. Это значит, что наряду с K_2^0-мезонами за второй перегородкой будут и K_1^0-мезоны. Опять удивительный факт: во второй перегородке частицы только поглощались, а за ней появлялись K_1^0-мезоны. Присутствие K_1^0 можно наблюдать по их распаду на π^- и π^+.

Итак, теоретики смогли детально описать необыкновенное поведение нейтральных K-мезонов. Слово было за экспериментаторами, и через два года после предсказаний, в 1956 г., мезон был обнаружен. Его время жизни оказалось в пределах от $3 \cdot 10^{-8}$ до 10^{-6} *сек*. Это было вторым успехом классификации странных частиц.

Подведем итоги классификации по изотопическому спину. Мы имеем синглет из гиперона лямбда Λ,

дублет гиперонов кси Ξ^-, Ξ^0 и триплет гиперонов Σ^0, Σ^+, Σ^-; K-частицы объединены в дублет K^+, K^0. Кроме того, имеются семейства античастиц с теми же значениями изотопических спинов: синглет антилямбда, дублет антикси, триплет антисигма и дублет K^-, $\overline{K}^0$. Все мезоны (π и K) уже найдены. В группе барионов из частиц не обнаружен еще нейтральный кси гиперон Ξ^0. Что касается античастиц, то они еще не наблюдались (за исключением антинейтрона, антипротона и антигиперона $\overline{\Lambda}$, о которых мы будем говорить ниже).

«Странность»

Классификация странных частиц по изотопическому спину позволяет в принципе также понять, какие реакции со странными частицами возможны, а какие запрещены. В этом смысле классификация вполне исчерпывающа. Однако если мы попытаемся применить ее к какому-нибудь конкретному превращению, то сразу же выявятся затруднения. Сущность новой загадки заключается в заряде, или, точнее, в среднем заряде каждого зарядового семейства странных частиц. Эту величину мы также называли раньше центром мультиплета.

Средний заряд, или центр мультиплета, очень легко найти — нужно сложить все заряды мультиплета и поделить на число частиц в нем. Так, средний заряд пимезонного семейства равен нулю, а средний заряд нуклонного семейства (нейтрон и протон) равен половине.

Из теоретических соображений, которые развивались еще до появления классификации, казалось очевидным, что все мезонные семейства должны будут иметь тот же зарядовый центр, что и семейство пи-мезонов, а все гиперонные семейства — тот же центр, что и у нуклонного семейства. Иными словами, предполагалось, что центр K-мезонного мультиплета должен быть при заряде, равном нулю, и что центр любого гиперонного мультиплета должен на-

ходиться при заряде, равном половине. Однако когда была начата классификация странных частиц, то выяснилось, что это не так. Любые попытки подогнать центр зарядовых семейств странных частиц к значениям центров пи-мезонных или нуклонных мультиплетов терпели неудачу.

Классификация привела к таким значениям изотопического спина странных частиц, которые просто не допускали совпадения центров гиперонных семейств с центром нуклонного, а центру K-мезонного семейства — с центром пимезонного. Действительно, для гиперона ламбда, который один составляет семейство, центр семейства находится в нуле вместо ожидаемой половины; для дублета гиперонов кси Ξ^-, Ξ^0 средний заряд равен $-1/2$ вместо $+1/2$, для триплета гиперонов сигма Σ^0, Σ^+, Σ^- центр мультиплета находится при нулевом заряде вместо ожидаемой половины, как у нуклона. Точно так же и для K-мезонов: центр дублета лежит при заряде, равном половине вместо нуля, как у пи-мезона.

В чем же дело? Может быть, не случайно центры зарядовых семейств странных частиц «смещены» по сравнению с центрами семейств обычных частиц — нуклонов и пи-мезонов? Может быть, это обстоятельство связано с неизвестными нам свойствами странных частиц? Американский физик Гелл-Манн и японский физик Нисидзима, предложившие классификацию странных частиц, утвердительно ответили на оба вопроса. В качестве характеристики особого свойства новых частиц они предложили взять удвоенное смещение центров зарядовых мультиплетов — для гиперонов по отношению к нуклонам, а для K-мезонов по отношению к пи-мезонам. Эту новую величину назвали странностью, она обычно обозначается буквой S.

Итак, странные частицы обладают странностью, а для обычных частиц (нуклон, пи-мезон) странность равна нулю. Для гиперона ламбда $S = -1$, для гиперонов кси $S = -2$, для гиперонов сигма $S = -1$. Странность семейства (K^+, K^0) равна $+1$.

Странность античастиц имеет знак, обратный странности частиц, так как частицы отличаются от

античастиц знаком заряда. Поэтому для семейства (K^-, $\overline{K}^0$) [античастиц по отношению к (K^+, K^0)] будет $S = -1$. Странности и изотопические спины элементарных частиц перечислены в табл. 4.

Таблица 4

Странности и изотопические спины элементарных частиц

Частица	Символ	Странность	Изотопический спин
Пи-мезоны	π^0, π^+, π^-	0	1
K-мезоны	K^+, K^0	+1	$1/2$
$\overline{K}$-мезоны	K^-, $\overline{K}^0$	−1	$1/2$
Нуклоны	p, n	0	$1/2$
Антинуклоны	$\overline{p}$, $\overline{n}$	0	$1/2$
Гиперон ламбда	Λ	−1	0
Антигиперон ламбда	$\overline{\Lambda}$	+1	0
Гипероны сигма	Σ^0, Σ^+, Σ^-	−1	1
Антигипероны сигма	$\overline{\Sigma}^0$, $\overline{\Sigma}^-$, $\overline{\Sigma}^+$	+1	1
Гипероны кси	Ξ^-, Ξ^0	−2	$1/2$
Антигипероны кси	$\overline{\Xi}^+$, $\overline{\Xi}^0$	+2	$1/2$

Каков же смысл введения странности? Все значение странности проистекает из того, что эта величина сохраняется во время реакций с сильным и электромагнитным взаимодействиями. Закон сохранения странности определяет особенности реакций со странными частицами. Но этот закон не является новым законом сохранения; сохранение странности вытекает из сохранения заряда, числа барионов и проекции изотопического спина I_z.

Каким же образом с помощью странности можно объяснить поведение нуклонов, пи-мезонов и странных частиц при превращениях? Начнем с загадки рождения и распада странных частиц, обсуждение которой и привело к открытию странности. Почему же странные частицы не могут рождаться поодиночке при столкновении пи-мезонов и нуклонов? Рассмотрим в качестве примера столкновение отрицательного

пи-мезона с протоном

$$\pi^- + p \rightarrow ?$$

Какие странные частицы могут образоваться при этом? Общая странность пи-мезона и протона равна нулю, так что в результате их соударения могут образоваться только такие частицы, суммарная странность которых также равна нулю. У нас нет странных частиц без странности, и в этом заключается секрет совместного образования странных частиц. Из таблицы странностей легко найти, какие сочетания K-мезона и гиперона (закон сохранения барионов!) приводят к нулевой странности, — это гиперон лямбда и K^0-мезон или гиперон сигма и K^+-мезон. Следовательно, если энергия достаточна, то столкновение π^- и p может привести к реакциям:

$$\pi^- + p \rightarrow \Lambda^0 + K^0;$$
$$\pi^- + p \rightarrow \Sigma^- + K^+.$$

Все остальные комбинации странных частиц здесь запрещены. Например, образование отрицательного K-мезона и положительного сигма

$$\pi^- + p \not\rightarrow \Sigma^+ + K^-$$

запрещается, так как при этом не сохраняется странность (суммарная странность Σ^+ и K^- равна —2). По этой же причине невозможно совместное рождение гиперона кси и K-мезона

$$\pi^- + p \not\rightarrow \Xi^- + K^+,$$

так как при такой реакции странность изменилась бы на единицу. Закон сохранения странности указывает нам, что гиперон кси может появиться только вместе с двумя K-мезонами:

$$\pi^- + p \rightarrow \Xi^- + K^+ + K^0.$$

С помощью странности можно также понять те превращения, которые вызывают гипероны при столкновении с нуклонами или ядрами. Гипероны сильно взаимодействуют с ядрами; гипероны лямбда входят

в состав так называемых гипер-ядер, т. е. ядер, у которых один из нейтронов заменен гипероном ламбда. Гипероны сигма и кси могут поглощаться ядрами с последующим развалом ядра. Например, при столкновении Σ^- с ядром может произойти реакция

$$\Sigma^- + p \to \Lambda + n$$

с одним из протонов ядра. Освобождающаяся при этом энергия достаточна для образования «звезды» (рис. 29).

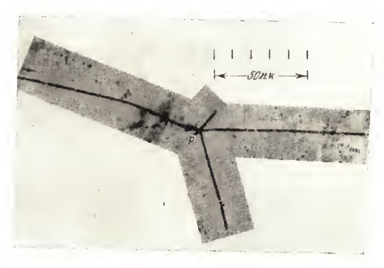


Рис. 29. Микрофотография ядерного расщепления, вызванного поглощением гиперона сигма Σ^-.

Итак, сохранение странности объясняет многие особенности поведения странных частиц. Неоднократно предпринимались попытки обнаружить реакции, запрещенные по странности, но безуспешно. С другой стороны, предсказанные сохранением странности превращения были обнаружены экспериментально.

До сих пор мы говорили о рождении странных частиц. Чем же объясняется их медленный распад?

И здесь опять играет роль странность, которая запрещает распад отдельной странной частицы на обычные частицы. Но странность не запрещает распад с превращением одной странной частицы в другую. Такое превращение известно — это распад нейтрального гиперона сигма на гиперон ламбда и фотон:

$$\Sigma^0 \rightarrow \Lambda + \gamma.$$

Здесь странность сохраняется: и сигма и ламбда имеют странность $S = -1$. Это единственный распад, который разрешен странностью. Присутствие фотона свидетельствует о том, что распад происходит за счет электромагнитного взаимодействия, хотя обе остальные частицы нейтральны. Впрочем, после того как мы познакомились с распадом нейтрального пи-мезона, читателя вряд ли удивит тот факт, что нейтральные частицы могут взаимодействовать с электромагнитным полем.

Распад нейтрального гиперона сигма, так же как и распад π^0-мезона, объясняется виртуальными процессами, в которых участвуют заряженные частицы. Странность разрешает превращение гиперона сигма Σ^0 в протон и отрицательный K-мезон, но этот распад может быть только виртуальным, так как масса покоя гиперона сигма меньше массы покоя протона и K-мезона, взятых вместе. Протон и K-мезон затем виртуально превращаются в гиперон ламбда и фотон, энергия которых, конечно, равна массе покоя гиперона сигма. Итак, распад нейтрального гиперона сигма можно представить так:

$$\Sigma^0 \rightarrow p + K^- \rightarrow \Lambda + \gamma.$$

Так как электромагнитное взаимодействие характеризуется временами порядка 10^{-20}—10^{-21} *сек* (см. табл. 2 на стр. 118), то можно ожидать, что время жизни нейтрального гиперона сигма равно примерно этой же величине. Время порядка 10^{-21} *сек* весьма мало́ по сравнению с временами жизни всех остальных частиц, и столь малые промежутки ученые еще не умеют измерять. Однако время жизни очень неустойчивой частицы можно найти измеряя не время,

а массу частицы. Такая возможность вытекает из соотношения неопределенностей для энергии и времени $\Delta E \cdot \Delta t \geqslant \hbar$. Согласно ему, если частица неустойчива, то ее энергия не может быть вполне определенной; неопределенность в энергии ΔE неустойчивой частицы, время жизни которой есть τ, равна $\Delta E \sim \frac{\hbar}{\tau}$. Для покоящейся частицы неопределенность энергии означает

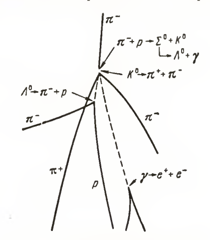


Рис. 30. Совместное рождение гиперона сигма и K^0-мезона в пузырьковой камере.

неопределенность в массе покоя $\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}$. Таким образом, время жизни частицы обратно пропорционально неопределенности в массе частицы

$$\tau \approx \frac{\hbar}{c^2 \cdot \Delta m}.$$

Чем меньше время жизни, тем больше Δm. Для времени жизни 10^{-21} *сек* получаем

$$\Delta m \sim \frac{\hbar}{c^2 \tau} \approx \frac{10^{-27}}{9 \cdot 10^{-2J} \cdot 10^{-21}} \approx 10^{-27} \text{ г},$$

что равно примерно массе электрона. Измерения времени жизни по неопределенности в массе частицы еще не производились.

Несмотря на очень малое время жизни, гиперон Σ^0 можно наблюдать. На рис. 30 представлена интересная схема, на которой, кроме распада Σ^0, можно видеть также распады Λ^0 и K^0 и образование пары e^+ и e^- — все в одном процессе, начатом быстрым пи-мезоном.

Распады всех странных частиц (кроме Σ^0) идут с несохранением странности. Только один тип взаимодействия — слабое взаимодействие — имеет привилегию нарушать закон сохранения странности. Но оно отличается от сильного примерно в 10^{14} раз. По этой причине распад с несохранением странности идет медленно.

ГЛАВА 6

ДОСТИЖЕНИЯ ПОСЛЕДНИХ ЛЕТ

Мы подходим к новому этапу в развитии современной физики элементарных частиц. Исключительные успехи в создании ускорителей, а также использование экспериментальных возможностей ядерных реакторов создали основу для достижений последних лет. В эти годы (начиная с 1955—1956 гг.) физики смогли решить старые проблемы об антипротоне, антинейтроне и неуловимом нейтрино. И в эти же годы изучение свойств K-мезонов привело к падению одного из важнейших принципов симметрии, правильность которого до сих пор считалась совершенно очевидной. Этим принципом был принцип зеркальной симметрии законов природы, с которым также связывался закон сохранения четности.

Зеркальная симметрия, или о «правом» и «левом»

Мы говорили ранее только об одном свойстве симметрии — симметрии относительно зарядового сопряжения, или зарядовой симметрии (см. гл. 2, «Частицы и античастицы»). Вследствие этого принципа симметрии законы природы не должны меняться, если все частицы заменить античастицами. Но физикам известно и много других свойств симметрии законов природы. Принципы симметрии выражают наиболее общие свойства природы, и неудивительно, что проверка их всегда интересует ученых.

Некоторые из принципов симметрии хорошо знакомы многим читателям, их содержание иногда воспринимается нами как само собой разумеющееся положение, и на первый взгляд мы не видим в нем ничего важного. Так, мы считаем не требующим пояснений тот факт, что явления природы не зависят от того, какой момент времени выбрать для начала отсчета. Мы придаем смысл только промежуткам времени, т. е. разности времен. Мы не сомневаемся, что если бы часы на Земле были переведены на один час вперед, то природа от этого не изменилась бы. Иначе говоря, равноправность всех моментов времени, принципиальная возможность любой момент принять за исходный (если не обращать внимания на удобства) кажется нам на первый взгляд свойством, не заслуживающим особого внимания. Между тем равноправность всех моментов времени является одним из важнейших свойств природы. Его значение, возможно, станет более ясно в свете той связи, которая существует между симметрией и законами сохранения. Эта связь такова: из принципа симметрии следует закон сохранения.

Вывод законов сохранения из свойств симметрии весьма сложен, и о нем нельзя рассказать на страницах этой книги. Поэтому мы должны принять как доказанное, что из равноправности всех моментов времени вытекает закон сохранения энергии, а принцип зеркальной симметрии приводит к закону сохранения четности. Таким образом, поиски новых свойств симметрии — это вместе с тем и поиски новых законов сохранения. Наши представления о симметрии устанавливаются путем обобщения опытных данных, по мере расширения наших знаний эти представления меняются. Хорошей иллюстрацией к этому может служить история принципа зеркальной симметрии.

Что же понимается под зеркальной симметрией? Предполагая зеркальную симметрию законов природы, мы тем самым предполагаем, что законы природы не изменятся, если заменить все явления на их зеркальные отражения. Это значит, что «правое» и «левое» равноценны: если какое-нибудь явление происходит

в нашем мире, то отражение этого явления в зеркале также может существовать.

Посмотрим на свое отражение в зеркале и вообразим, что зеркало — это окно. Тогда мы увидим своего двойника, который во всем повторяет оригинал с той, однако, существенной разницей, что левая сторона двойника совпадает с нашей правой стороной, а правая сторона двойника — с нашей левой стороной. Так, сердце у двойника будет находиться справа и т. д. Принцип зеркальной симметрии в применении к этому случаю означал бы, что принципиально возможно существование людей с зеркально отображенным расположением органов наряду с людьми, у которых органы расположены обычным образом. «Зеркальные» люди на Земле есть, и это дает нам «экспериментальную» основу для предположения о зеркальной симметрии.

У читателя может возникнуть вопрос: если зеркальная симметрия присуща всем законам, то почему у подавляющего большинства людей сердце находится слева? Признавая зеркальную симметрию как всеобщее свойство законов, мы должны искать причины такой асимметрии в посторонних обстоятельствах. Можно думать, например, что при другом стечении обстоятельств, где-нибудь на планетах в далеких звездных системах, у большинства животных сердце находится справа.

Но факт существования «зеркальных» людей еще не доказывает зеркальную симметрию даже в этом частном случае, так как этот факт можно объяснить и иначе — предполагая, что зеркальная симметрия свойственна лишь части законов, а не всем. Для выяснения, что происходит в действительности, следовало бы детально изучить все законы. Изучая сложные тела неорганического мира, ученые пришли к заключению, что общие свойства симметрии законов природы прежде всего должны проявляться в процессах, происходящих с простейшими частицами. Многочисленные опыты с простейшими объектами — атомами, ядрами и элементарными частицами — до самого последнего времени подтверждали принцип зеркальной

симметрии. С другой стороны, физиками хорошо изучены силы, объединяющие атомы в молекулы, молекулы в тела, и здесь также выполняется принцип зеркальной симметрии. Все это убеждало во всеобщности свойства зеркальной симметрии.

Обратимся теперь к представлению о четности. Само по себе понятие четности — это чисто квантовое понятие; оно не существует в классической физике, и его нельзя объяснить наглядным образом. Представлению о четности принадлежит важная роль в формулировке принципа зеркальной симметрии.

Мы уже познакомились с несколькими, на первый взгляд, необычными свойствами элементарных частиц — спином, изотопическим спином, странностью. Но этим не исчерпывается перечень новых (в сравнении с телами макромира) свойств, которыми характеризуются элементарные частицы. В квантовой механике доказывается, что элементарным частицам можно приписать еще одно свойство — четность (или внутреннюю четность).

Четность частицы показывает, как изменяется при отражении всех координат (т. е. при замене координат x, y, z на $-x$, $-y$, $-z$) так называемая волновая функция частицы, с помощью которой в квантовой механике описывают движение частицы.

Поясним более подробно это обстоятельство. Пусть $\psi(x, y, z)$ — волновая функция частицы, которая зависит от координат x, y, z (квадрат модуля $|\psi|^2$ имеет смысл вероятности того, что частица имеет координаты x, y, z). Произведем отражения координат, т. е. заменим x, y, z на $-x$, $-y$, $-z$ и предположим, что волновая функция $\psi(-x, -y, -z)$ отличается от первоначальной $\psi(x, y, z)$ только множителем: $\psi(x, y, z) = a\psi(-x, -y, -z)$, где a — некоторое число. Если мы проделаем подряд два отражения, то вернемся к первоначальным координатам x, y, z. С другой стороны, при втором отражении появится еще один множитель a, так что в результате функция $\psi(x, y, z)$ умножится на a^2:

$$\psi(x, y, z) = a\psi(-x, -y, -z) = a^2\psi(x, y, z).$$

Отсюда заключаем, что должно быть $a^2 = 1$ или $a = \pm 1$. Величина a называется четностью. Эти соображения верны для частиц без спина; в ином случае вывод и результаты значительно усложняются.

Четность частицы без спина может быть равна либо $+1$, либо -1. В частности, согласно многочисленным опытам, пи-мезон — нечетная частица, т. е. его четность равна -1. О частице с четностью $+1$ говорят как о четной частице. Если у нас есть несколько частиц, то при малых скоростях их полная четность равна произведению (а не сумме!) четностей каждой из частиц.

С помощью представления о четности принцип зеркальной симметрии облекается в математическую форму — в форму закона сохранения четности. Если законы природы зеркально симметричны, то полная четность частиц не может изменяться при превращениях, если же полная четность не сохраняется, то принцип зеркальной симметрии неверен. Закон сохранения четности считался столь же несомненным, как, например, закон сохранения импульса или момента количества движения. Все опыты до последнего времени подтверждали сохранение четности, и, кроме того, казалось вполне естественным, что «правое» и «левое» в природе должны быть равноценны.

Но загадка «тау — тета», возникшая при изучении K-мезонов, заставила ученых задуматься над вопросом: сохраняется ли четность? Мы видели, что K-мезон может распадаться как на два пи-мезона, так и на три пи-мезона.

Суть загадки состояла в следующем: по закону сохранения четности на два пи-мезона может распадаться только частица с четностью $+1$, а распад на три пи-мезона разрешен лишь для частицы с четностью -1. Если предполагать, что четность сохраняется, то мы должны были бы считать, что существуют две K-частицы: тау-мезон с четностью -1, который может распадаться на три пи-мезона, и тета-мезон с четностью $+1$, который распадается на два пи-мезона. С другой стороны, все остальные свойства «тау» и «тета» указывают как будто на их тождествен-

ность: массы, времена жизни и, по-видимому, спины обеих частиц одинаковы. К тому же различные способы распада всегда встречаются в постоянном соотношении: независимо от способа образования K-мезонов распад на три пи-мезона наблюдается примерно в три раза реже, чем распад на два пи-мезона.

Итак, либо тау и тета тождественны, но тогда не сохраняется четность и нет зеркальной симметрии, либо тау и тета различны, но в этом случае совпадение всех остальных свойств обеих частиц становится необъяснимым.

Два китайских физика Ли и Янг, работающие в США, занимались также загадкой «тау — тета». Они проверили тщательно экспериментальные данные и установили, что еще не было проведено таких опытов, которые доказывали бы сохранение четности при слабых взаимодействиях. Опыты свидетельствовали только о сохранении четности в пимезонном и электромагнитном взаимодействиях. И тогда Ли и Янг выдвинули предположение, что при слабых взаимодействиях четность может не сохраняться. Они указали также опыты, которые подтвердили бы или опровергли их теорию — это был бета-распад, или, точнее, изучение тонких деталей бета-распада, а также распад пи- и мю-мезонов.

Экспериментаторы откликнулись на предложение Ли и Янга, и уже через несколько месяцев группа физиков под руководством китаянки Ву, работающей в США, подтвердила несохранение четности при бета-распаде. Первым и решающим опытом был бета-распад кобальта-60, при котором кобальт-60, испуская электрон и нейтрино, превращался в никель-60:

$$Co^{60} \to Ni^{60} + e^- + \bar{\nu}.$$

В этом опыте было обнаружено, что картина распада кобальта-60 не обладает зеркальной симметрией.

Что же именно наблюдалось в опытах с кобальтом? Схематически распад кобальта-60 изображен на рис. 31. Ядро кобальта нарисовано в виде шарика со стрелкой, указывающей спиновое вращение ядра.

В опытах наблюдалось, что электроны вылетают преимущественно в одном направлении относительно спинового вращения ядра. Это направление отмечено на рисунке тремя стрелками. Вот эта-то направленность выброса электронов кобальтом и противоречит принципу зеркальной симметрии. В самом деле если бы

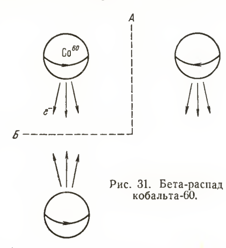


Рис. 31. Бета-распад кобальта-60.

принцип зеркальной симметрии был верен, то зеркальное изображение бета-распада кобальта-60 было бы также бета-распадом кобальта — картина распада не изменилась бы при отражениях в зеркалах *А* и *Б*. Однако так как электроны вылетают только в одном направлении, то отражения в зеркалах дают иную картину. При отражении в зеркале *Б* спиновое вращение остается неизменным, но электроны излучаются в иную сторону. При отражении в зеркале *А* распределение электронов не меняется, но зато меняется направление спинового вращения.

Из-за отсутствия зеркальной симметрии в этом распаде следует, что закон сохранения четности здесь нарушается. В дальнейшем доказательства несохранения четности были получены в опытах по распаду мезонов и гиперонов, а также при изучении бета-распада некоторых других ядер. Гипотеза Янга и Ли под-

твердилась — в слабых взаимодействиях четность не сохраняется.

Как мы уже знаем, процессы, вызываемые слабыми взаимодействиями, редки по сравнению с электромагнитными процессами и процессами, вызываемыми сильными взаимодействиями (пимезонным и гиперонными). Таким образом, основная масса явлений протекает с сохранением четности. Однако о принципе зеркальной симметрии как общем принципе симметрии законов природы уже говорить нельзя.

Здесь сразу же возникает трудная проблема. Можно представить себе, что законы движения частиц являются зеркально несимметричными. Но как представить асимметрию пространства? Неужели же пространство несимметрично относительно правого и левого, т. е. как бы закручено, и зеркальное изображение пространства отличается от самого пространства? Как же пустое пространство (вакуум) может быть несимметричным?

Советский ученый акад. Л. Д. Ландау и независимо от него Ли и Янг указали возможное решение проблемы. В их теории зеркальной симметрией обладает пространство, но не элементарные частицы, которые наделяются иными свойствами. Как мы знаем, каждой частице соответствует античастица. Новая теория связывает частицы и античастицы зеркальным отражением: если, например, у нас есть протон, то его зеркальным изображением будет антипротон. Напомним, что ранее (когда верили в сохранение четности) считалось, что отражением протона в зеркале является протон. Предполагалось также, что отражение тела в зеркале отличается от самого тела только заменой «левого» на «правое» и наоборот. Согласно же новой теории, кроме этого, отражение должно состоять не из вещества, а из антивещества. Новое преобразование, объединяющее зеркальное отражение и переход от частицы к античастице, было названо комбинированной инверсией.

Подведем итоги. До открытия несохранения четности считалось, что имеются два отдельных свойства симметрии — зеркальная симметрия и зарядовая

симметрия (точнее симметрия относительно замены частиц на античастицы). Оказалось, что на самом деле в природе осуществляется более сложный вид симметрии — законы не изменяются, если вместо самого явления мы рассматриваем его зеркальное изображение и при этом все частицы заменяем античастицами. Так, в опыте с распадом кобальта (рис. 31) зеркальное изображение представляет картину распада антикобальта, т. е. картину распада ядра, содержащего вместо протонов и нейтронов антипротоны и антинейтроны; при этом антикобальт вместо электронов испускает позитроны. Зеркальное отражение переводит нейтрино в антинейтрино, так что несохранение четности в распадах с участием нейтрино можно считать следствием того, что нейтрино отличается от антинейтрино.

Антибарионы

Существуют ли предсказанные теоретиками антипротон, антинейтрон и другие тяжелые античастицы? Этот вопрос более двадцати лет волновал физиков, хотя они встречались с многими косвенными доказательствами реальности этих частиц. Многие явления удавалось объяснить только с помощью антипротона и антинейтрона, и их существование предполагалось все время в теоретических рассуждениях. Мы видели, например, что без антипротонов нельзя понять распад нейтрального пи-мезона на два фотона. Но косвенных доказательств было недостаточно. Теоретическое предсказание антипротона, антинейтрона и других античастиц основывалось на важнейшем принципе физики — принципе зарядового сопряжения; поэтому были необходимы непосредственные доказательства реальности этих частиц. Нужно было «увидеть» в опыте антипротон, антинейтрон и антигипероны и тем самым убедиться в справедливости принципа зарядового сопряжения.

Начнем с открытия антипротона. Как мы видели в гл. 2, свойства антипротона были подробно описаны

теоретиками еще во времена открытия позитрона. Свойства антипротона и позитрона, также как и их судьба, во многом схожи. Путь позитрона в веществе недолог: встретившись с одним из электронов вещества, позитрон и электрон превращаются в фотоны. Точно так же и антипротон, попав в вещество, быстро находит себе пару — протон и вместе с ним превращается в фотоны или мезоны. Но в отличие от позитрона, рождение антипротона в природе представляет собой очень редкое явление. Для рождения пары позитрон — электрон нужна небольшая энергия (не менее 1 млн. *эв*), а для рождения пары протон — антипротон требуется высокая энергия, измеряемая миллиардами электрон-вольт. Благодаря небольшой энергии, необходимой для рождения, позитроны могут образовываться при распаде радиоактивных ядер и в большом числе столкновений между частицами. Единственным же источником природных антипротонов могут быть космические лучи, или, точнее, те реакции, которые вызываются космическими частицами.

Очень большая энергия, необходимая для рождения антипротонов, и малое число космических частиц очень высокой энергии чрезвычайно уменьшают вероятность увидеть антипротон среди космических превращений. Многочисленные поиски антипротонов и антинейтронов в космических лучах не дали результатов, и все надежды физиков, в конце концов, были возложены на ускорители. Прошло много лет, пока не были построены ускорители, создающие частицы с энергией, достаточной для рождения антипротона. Энергия, соответствующая массе покоя протона, равна 938 млн. *эв* (т. е. около 1 млрд. *эв*), но в силу ряда причин энергия ускорителей, в которых можно было бы надеяться найти антипротоны, должна быть значительно выше. Поскольку антипротон появляется в паре с протоном, то требуемая энергия повышается примерно до 2 млрд. *эв*.

Далее, при рождении протон — антипротонной пары в ускорителе всегда участвуют другие частицы. Обычно в ускорителе разгоняются протоны, так что рождение пары может произойти при столкновении

ускоренного протона с одним из протонов мишени:

$$p + p \to p + \bar{p} + p + p.$$

Вместо двух сталкивающихся протонов после реакции имеются четыре частицы: три протона p и антипротон $\bar{p}$. Каждая из этих частиц уносит еще дополнительную энергию в виде кинетической энергии. В результате оказывается, что для образования протон-антипротонной пары в ходе такой реакции нужно, чтобы начальный протон имел энергию около 6 млрд. *эв*, что в 6 раз больше энергии покоя антипротона. Первым ускорителем, превысившим этот предел, был синхрофазотрон Калифорнийского университета (США). Этот ускоритель, известный под названием «беватрона», может сообщать протонам энергию до 6,2 млрд. *эв*.

Решение проблемы антипротона было одной из главных задач беватрона. Мы не будем сейчас объяснять, что такое синхрофазотрон, поскольку в следующем параграфе говорится о гигантском синхрофазотроне в г. Дубна (СССР), а рассмотрим сразу схему первого опыта, в котором был обнаружен антипротон. Этот опыт был проведен в 1955 г. группой американских физиков, возглавляемой Сегре. Схема установки представлена на рис. 32.

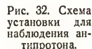


Рис. 32. Схема установки для наблюдения антипротона.

В результате соударения протонов с ядрами мишени образовывались различные частицы — главным образом пи-мезоны. Среди этих частиц были и антипротоны. Главной (и самой трудной) задачей экспериментаторов было различить антипротоны среди множества других частиц. Чтобы можно было с уверенностью отождествить новую частицу с антипротоном, нужно было определить ее

массу и заряд. И потому основная цель установки, изображенной на рис. 32, заключалась в «уловии» частицы с массой и зарядом антипротона.

Ускоренные протоны с энергией около 6,2 млрд. *эв* направлялись на мишень *М* (медную пластинку), в которой происходили реакции с образованием пи-мезонов π и антипротонов *p*. Далее пучок образовавшихся частиц направлялся в магнитную линзу *Л*, которая выделяла только частицы с определенным импульсом и отрицательным зарядом. Один и тот же импульс мог иметь разные частицы; но при одинаковом импульсе легкие частицы движутся быстрее тяжелых. Пучок частиц состоял, в основном, из пи-мезонов, среди которых встречались изредка антипротоны. Масса пи-мезона в 6,5 раза меньше массы протона, и потому после первой магнитной линзы *Л* в пучке отрицательных частиц в общий поток быстрых мезонов были вкраплены более медленные антипротоны. Скорость мезонов в этом пучке почти равнялась скорости света, а скорость антипротонов достигла 78% от скорости света. И вот это-то различие скоростей и использовалось для выделения антипротонов из общего потока, в котором на один антипротон приходится несколько десятков тысяч мезонов.

На концах отрезка пути в 40 футов (~ 12 *м*) было помещено два сцинтилляционных счетчика C_1 и C_2, регистрировавших моменты прохождения частиц. Антипротон должен был затрачивать на этот путь 51 миллиардную долю секунды, а мезоны — 40 миллиардную. Система отсчета времени, которую использовали в этом опыте, могла отмерять времена с точностью до миллиардной доли секунды. Оба счетчика были включены в схему, которая срабатывала только при прохождении частицы через оба счетчика с интервалом в 51 миллиардную долю секунды, т. е. схема должна была отмечать только антипротоны.

Однако эти измерения не гарантировали того, что срабатывание обоих счетчиков сигнализировало всегда об антипротоне. Сигналы могли вызываться и мезонами — один мезон мог пройти через первый

счетчик, а через 51 миллиардную долю секунды другой случайный мезон мог вызвать отсчет, проходя через второй счетчик. Поэтому вслед за вторым счетчиком были помещены контрольные счетчики. Первый контрольный счетчик отбирал только частицы определенной скорости — антипротонной скорости, а второй контрольный счетчик давал сигналы только при прохождении через него любой частицы со скоростью, бо́льшей скорости антипротонов. Контрольные счетчики, таким образом, отбрасывали случайные совпадения, вызываемые мезонами.

С помощью такой методики Сегре и его сотрудникам удалось показать, что среди частиц, рожденных в беватроне, имеются и антипротоны. Впоследствии антипротоны были обнаружены и в фотоэмульсии пластинок, «экспонированных» в потоке частиц, идущем из беватрона. Войдя в эмульсию, антипротон терял свою кинетическую энергию в столкновениях и останавливался. Пробег антипротона до остановки хорошо согласовался с вычислениями. Затем антипротон поглощался ядром и сразу же аннигилировал с одним из протонов (или нейтронов) ядра, приводя к взрыву ядра (рис. 33). Подсчет выделенной энергии подтверждал, что первоначальная частица — антипротон.

Интересные вопросы возникли при изучении антипротонов уже после первых опытов. Было найдено, например, что антипротон взаимодействует с ядрами значительно активнее, чем предполагалось. Дальнейшие опыты, возможно, откроют и другие неожиданные особенности взаимодействия антипротона с элементарными частицами.

После экспериментального подтверждения существования антипротона вопрос об антинейтроне можно было считать решенным. Действительно, было бы по меньшей мере странно, если бы общая идея о частицах и античастицах, подтвержденная еще раз на примере антипротонов, оказалась бы несостоятельной в применении к нейтрону — «собрату» протона по зарядовому семейству «нуклон».

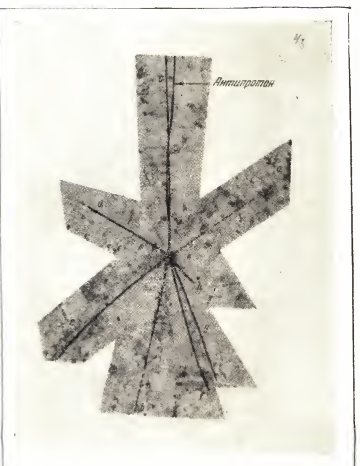


Рис. 33. Захват антипротона ядром приводит к взрыву ядра, осколки которого образуют «звезду».

Следы *a* и *b* принадлежат пи-мезонам, след *c* — протону; остальные следы оставлены протонами или альфа-частицами.

Как мы уже говорили, общая закономерность «наряду с частицей существует и античастица» не означает ничего нового только в случае, когда нейтральная частица совпадает со своей античастицей. Так было с фотоном и нейтральным пи-мезоном. Но антинейтрон должен отличаться от нейтрона, в частности, по знаку магнитного момента. Особенно наглядно это отличие будет проявляться при неэлектромагнитных взаимодействиях; например, в пимезонном или ядерном взаимодействии: столкновение нейтрона с протоном должно привести к иным результатам, чем столкновение антинейтрона с протоном. Наиболее ярким контрастом между поведением нейтрона и предполагаемым поведением антинейтрона является возможность аннигиляции антинейтрона и нейтрона или антинейтрона и протона с испусканием мезонов и фотонов, поскольку два нейтрона или нейтрон и протон никогда не могут превратиться только в мезоны и фотоны (закон сохранения числа нуклонов!). Поиски антинейтрона основывались на своеобразной реакции перезарядки, которую могли вызвать антипротоны. В этой реакции антипротон при встрече с протоном превращается в нейтрон и антинейтрон

$$p+\bar{p}\rightarrow n+\bar{n}$$

или же антипротон в столкновении с нейтроном испускает положительный пи-мезон:

$$\bar{p}+n\rightarrow\bar{n}+n+\pi^{+}.$$

Поэтому поиски антинейтрона начались тотчас же после обнаружения антипротонов. Пучок частиц, содержащий антипротоны, о котором только что так много говорилось, направлялся в блок вещества, где должна была произойти реакция перезарядки. Ожидания физиков оправдались. В результате перезарядки образовались антинейтроны, которые регистрировались по мощному пимезонному излучению, возникающему при последующей аннигиляции антинейтрона с одним из нейтронов вещества.

Итак, к числу частиц, обнаруженных экспериментально, прибавилось еще две, и теоретики могли с

удовлетворением отметить силу принципа зарядового сопряжения.

С открытием антипротона и антинейтрона симметрию законов природы относительно частиц и античастиц можно считать установленной экспериментально. Тем не менее, большой интерес представляет вопрос об антигиперонах.

Как и в случае антипротона и антинейтрона, основная трудность для наблюдения антигиперонов заключается в высокой энергии, необходимой для их образования вследствие закона сохранения барионов. Так, для образования антигиперона лямбда $\overline{\Lambda}$ протонами в ходе реакции

$$p+n\rightarrow\Lambda+\overline{\Lambda}+p+n,$$

т. е. при столкновении протона и нейтрона, нужна энергия в $7{,}1\cdot10^9$ *эв*.

При рождении антигиперона $\overline{\Lambda}$ под действием π^--мезона нужны значительно меньшие энергии — примерно $4{,}7\cdot10^9$ *эв*. Образование антигиперона в этом случае может произойти в результате превращения

$$\pi^-+p\rightarrow\Lambda+\overline{\Lambda}+n.$$

Эти предположения подтвердились. В конце 1958 г. среди реакций, произведенных в фотоэмульсии π^--мезонами с энергией $5\cdot10^9$ *эв* (в беватроне, США), была найдена «звезда» распада антигиперона $\overline{\Lambda}$. При распаде антигиперон лямбда превратился в антипротон и π^+-мезон.

Дальнейшее изучение реакций, вызываемых быстрыми пи-мезонами, привело к открытию антигиперона $\overline{\Sigma^-}$ (обладающего положительным электрическим зарядом!). Группа сотрудников Объединенного Института ядерных исследований в г. Дубне обнаружила (1960 г.) в пузырьковой камере интересную серию превращений, вызванных быстрым π^--мезоном, образовавшимся при столкновении ускоренного в синхрофазотроне протона с ядрами вещества (см. рис. 34). С помощью законов сохранения энергии, заряда, барионного заряда и странности одна из образовавшихся

в точке A частиц была отождествлена с антигипероном $\overline{\Sigma^-}$. Этот антигиперон в точке B распался на антинейтрон и положительный пи-мезон. Антинейтрон, столкнувшись в точке C с ядром, образовал «звезду».

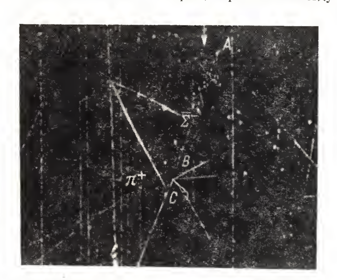


Рис. 34. Гиперон $\overline{\Sigma}^-$ в пузырьковой камере.

Вскоре после открытия частицы $\overline{\Sigma^-}$ группа итальянских физиков нашла вторую частицу из триплета антигиперонов $\overline{\Sigma}$ — отрицательно заряженный $\overline{\Sigma^+}$-гиперон. Почти в это же время появилось сообщение о такой реакции, которая естественно объяснялась лишь в предположении, что одна из родившихся частиц — это нейтральный $\overline{\Sigma^0}$-гиперон. Таким образом, теперь известен весь триплет античастиц гиперонов сигма.

Для рождения антигиперонов кси нужна значительно бóльшая энергия, чем для создания антипротона. Кроме того, так как странность каскадного гиперона равна —2, закон сохранения странности воспрещает образование антигиперона кси в паре с протоном или гипероном лямбда в результате столкновения пи-

мезонов с протонами. Эти обстоятельства затрудняют поиски каскадных антигиперонов. Однако было бы совершенно невероятно, если бы эти гипероны не существовали. Их открытие в будущем безусловно интересно, но не вызовет научной сенсации.

Реакции с антигиперонами подтвердили закон сохранения числа барионов. Подобно тому как закон сохранения числа нуклонов можно формулировать в виде закона сохранения ядерного заряда, так и вместо числа барионов можно пользоваться понятием о барионном заряде B. Всем барионам — нуклонам и гиперонам — приписывается $B = 1$, а антибарионам — значение $B = -1$. Для остальных частиц $B = 0$. Общий барионный заряд системы частиц есть алгебраическая сумма зарядов отдельных частиц. При реакциях общий барионный заряд не изменяется — в полной аналогии с электрическим зарядом. Именно законом сохранения барионного заряда B объясняется устойчивость протона к распадам на более легкие частицы — мю-мезоны и фотоны, позитроны и пи-мезоны и т. д., которые разрешены остальными законами сохранения. Иначе говоря, стабильность вещества в нашей Вселенной есть следствие этого закона. Таким образом, барионный заряд принадлежит к числу наиболее фундаментальных характеристик элементарных частиц.

Любопытно, что закон сохранения барионного заряда экспериментально проверен с бо́льшей точностью, нежели закон сохранения электрического заряда. Так, при изучении предполагаемого распада протона на электрон и два позитрона

$$p \to e^- + e^+ + e^+$$

(такая реакция противоречит закону сохранения барионного заряда!) небольшие ошибки эксперимента не позволили безусловно утверждать, что такой реакции не существует; можно было только сказать, что время жизни протона будет не меньше 10^{23} лет.

При поисках же реакции распада электрона на нейтрино и фотон

$$e^- \to \nu + \gamma,$$

где не сохраняется электрический заряд, нижняя граница времени жизни электрона была определена в 10^{19} лет.

Сколько нейтрино существует в природе?

Предсказание нейтрино опиралось на закон сохранения энергии (см. гл. 2): отбрасывание гипотезы о нейтрино было равносильно предположению о несохраняемости энергии, так как иным образом нельзя было объяснить распады многих частиц — и нейтрона, и пи-мезонов, и мю-мезонов. Поэтому прямое доказательство существования нейтрино ожидалось с большим интересом, хотя вряд ли среди физиков нашелся бы человек, который не был бы убежден в его реальности.

В нейтринных опытах пришлось преодолевать трудности совсем иного рода, чем в поисках антипротона и антинейтрона. Нейтрино — нередкий гость в природе. Большие потоки нейтрино посылает на Землю Солнце. Попадают на Землю и нейтрино от звезд и далеких галактик. Трудности в наблюдении нейтрино проистекают от его свойств, делающих нейтрино невидимым. За годы, прошедшие с момента предсказания нейтрино до его открытия в эксперименте, физики узнали коечто новое о нейтрино, но эти сведения не могли помочь в поисках. Была уточнена масса нейтрино — опыты свидетельствовали, что она не превосходит пятисотой доли электронной массы. Было выяснено, что если нейтрино и обладает магнитным моментом, то он не превышает одной миллиардной части магнитного момента электрона. «Неуловимость» нейтрино по-прежнему была главным злом, и только при наличии исключительно мощного источника нейтрино можно было надеяться на успех. Такими мощными источниками оказались ядерные реакторы. При делении тяжелых атомных ядер в реакторе образуется большое число неустойчивых продуктов деления, излучающих нейтрино при бета-распаде. Вот этот-то поток нейтрино и был использован для эксперимента. Проходя через веще-

ство, нейтрино (точнее — антинейтрино) в столкновении с протоном может вызвать реакцию

$$\bar{\nu}+p\rightarrow n+e^{+},$$

в которой вместо начальных антинейтрино и протона образуются нейтрон и позитрон. Сумма масс позитрона и нейтрона больше чем сумма масс нейтрино и протона на 3,5 электронной массы, и потому это превращение может произойти только если энергия налетающего нейтрино превышает 3,5 энергии покоя электрона, что составляет около 2 млн. *эв.* Так как нейтрино и антинейтрино — различные частицы, то написанная нами реакция является единственным типом реакции при небольшой энергии, которую может начать антинейтрино. Другая реакция, когда антинейтрино поглощается нейтроном с образованием затем протона и электрона, будет тогда запрещена — в ней должно участвовать нейтрино:

$$\nu+n\rightarrow p+e^{-}. \text{*)}$$

Иначе говоря, при небольшой энергии (когда столкновения нейтрино с электронами не могут привести к появлению мезонов) нейтрино теряется только в реакциях с протоном, включая, конечно, и тот случай, когда протон находится в ядре. Эта реакция очень медленна, поскольку она вызывается тем же слабым взаимодействием, что и при бета-распаде. При значениях энергии в несколько миллионов электрон-вольт, т. е. при значениях, немного превышающих порог реакции нейтрино — протон, средняя длина пути нейтрино, который оно проходит до поглощения протоном, будет измеряться теми же расстояниями, что и радиус нашей галактики. Если же энергия нейтрино меньше порога реакции $\nu+p$, то и это ограничение отпадает. Вещество абсолютно проницаемо для таких нейтрино. В потоке, выходящем из атомного реактора,

*) В дальнейшем при описании опытов по обнаружению нейтрино для простоты мы не будем делать различия между нейтрино и антинейтрино, так как существование одной частицы означает и существование другой.

нейтрино более эффективны, но вероятность захвата нейтрино протоном все же очень мала. В 50 *л* воды, расположенных вблизи реактора, происходит в час несколько таких превращений, и эти превращения разыгрываются на фоне тысяч превращений, вызываемых нейтронными потоками и гамма-лучами из реактора, а также космическими лучами. Задача экспериментаторов заключалась в отделении очень редких реакций, связанных с нейтрино, от множества других превращений.

Что же нужно наблюдать, какие явления нужно зарегистрировать, чтобы с уверенностью считать нейтрино обнаруженным? Если нейтрино попадает в воду и в ней захватывается протоном, то образуются нейтрон и позитрон. Именно по появлению позитрона и нейтрона и судят о нейтрино. Позитрон, пройдя небольшое расстояние в воде, останавливается и вместе с электроном превращается в два фотона. Появление позитрона мы можем, таким образом, выявить по аннигиляционным фотонам. Эти фотоны легко отличить от гамма-лучей из ядерного реактора, так как энергия каждого из фотонов равна примерно 0,5 млн. *эв* и они разлетаются в противоположные стороны. Чтобы сделать заметным появление нейтрона, в воде растворяют соль кадмия, который охотно захватывает нейтроны. Тогда нейтрон блуждает в течение некоторого времени, сталкиваясь с атомами, пока, в конце концов, не поглощается ядром кадмия, которое при этом излучает несколько фотонов, сигнализируя о нейтроне. Итак, это превращение дает о себе знать двумя аннигиляционными фотонами и запаздывающим на несколько микросекунд гамма-излучением кадмия.

Схематически устройство для наблюдения реакции $\nu + p \rightarrow n + e^{+}$ изображено на рис. 35. Реакция происходит в баке *A*, заполненном водой, в которой растворен хлористый кадмий. Излучение, возникающее при аннигиляции позитрона с электроном вещества, регистрируется жидкими сцинтилляторами *I* и *II*. С помощью этих же сцинтилляционных счетчиков отмечаются гамма-лучи кадмия, вызываемые захватом нейтрона.

Очевидно, что чем больше слой воды, тем больше событий с нейтрино мы можем увидеть. С другой стороны, если слой воды *A*, где происходят реакции с нейтрино, будет слишком толст, то тогда аннигиляционные фотоны будут поглощаться водой, а не счетчиками *I* и *II*. В эксперименте, проведенном в 1956 г. американскими физиками Рейнесом и Коуэном, слой

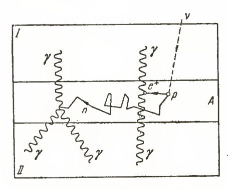


Рис. 35. Наблюдение нейтрино по реакции $\nu + p \to n + e^{+}$.

A содержал 200 *л* воды. Столь большой объем «рабочего» пространства для нейтрино потребовал и невиданных ранее количеств сцинтиллятора, занимавшего объем свыше 300 *л*. Все устройство имело вид бутерброда: между тремя слоями сцинтилляционной жидкости находились два плоских бака с водой. По краям «бутерброда» были расположены 150 фотоумножителей, ловивших вспышки в сцинтилляторе, вызванные аннигиляционными фотонами и гамма-лучами кадмия. Чтобы защитить установку от внешних излучений, она была заключена в свинцово-парафиновый ящик, и затем все было зарыто глубоко в землю около реактора одного из атомных заводов в США. Наблюдения, которые осуществлялись с расстояния, воссоздали ожидаемую картину явления, указывая тем самым на реальность нейтрино.

Возвратимся теперь к вопросу об антинейтрино. Чем отличается эта частица от нейтрино?

Опыт показывает, что помимо закона сохранения барионного заряда, относящегося к тяжелым фермионам — протонам, нейтронам и гиперонам, — существует аналогичный закон сохранения, касающийся только легких фермионов, или лептонов, т. е. нейтрино, электронов и мю-мезонов. Все лептоны характеризуются лептонным зарядом $L = 1$, все антилептоны — лептонным зарядом $L = -1$; лептонные заряды остальных частиц полагаются равными нулю. Общий лептонный заряд системы частиц есть сумма лептонных зарядов отдельных частиц — как и в случае барионного и электрического зарядов. Закон сохранения лептонного заряда гласит, что во всех превращениях общий лептонный заряд не меняется, т. е. величина

(число лептонов) — (число антилептонов)

остается неизменной при всех взаимодействиях.

Таким образом, отличие нейтрино от антинейтрино состоит в том, что эти частицы несут различные лептонные заряды.

Пользуясь законом сохранения лептонного заряда, легко установить, в какой реакции участвует нейтрино, а в какой — антинейтрино. Полагая для электрона $L = 1$ (т. е. считая электрон частицей), а для позитрона $L = -1$, находим, что при бета-распаде нейтрона излучается антинейтрино:

$$n \to p + e^- + \bar{\nu},$$

а при позитронном бета-распаде должно излучаться нейтрино:

$$C_6^{11} \to B_5^{11} + e^+ + \nu.$$

Так как лептонный заряд пи-мезона равен нулю, то знаки лептонных зарядов его продуктов распада должны быть противоположны. Так как отрицательный мю-мезон является частицей, т. е. для него $L = 1$, то положительный пи-мезон распадается с образова-

нием нейтрино:

$$\pi^+ \to \mu^+ + \nu,$$

а отрицательный пи-мезон — с образованием антинейтрино.

И позитрон и антинейтрино обладают одним и тем же лептонным зарядом, и, следовательно, в опытах Рейнеса и Коуэна действительно наблюдалось не нейтрино, а антинейтрино.

Но с обнаружением нейтрино (и антинейтрино) «нейтринная» эпопея не закончилась. Изучение распадов мю-мезонов показало, что никогда не наблюдаются распады мю-мезонов на электроны, например,

$$\mu^+ \to e^+ + e^- + e^+$$

или на электрон и фотон

$$\mu^\pm \to e^\pm + \gamma.$$

Возникло подозрение, что электроны и мю-мезоны отличаются друг от друга не только массой, но и некоторым дополнительным свойством, которое можно было бы назвать мюонным зарядом G_μ. Если приписать $\mu^\pm$-мезонам значения $G_\mu = \pm 1$ и считать, что для электронов и позитронов $G_\mu = 0$, то тогда отсутствие таких распадов есть следствие закона сохранения G_μ. Из анализа опытов можно найти, что для пи-мезонов будет также $G_\mu = 0$.

Гипотеза о существовании (и сохраняемости) мюонного заряда G_μ ведет к важному следствию. Так как пи-мезоны распадаются на мю-мезоны и нейтрино, например,

$$\pi^+ \to \mu^+ + \nu,$$

то легко подсчитать, что при сохранении G_μ нейтрино в этом распаде должно также обладать мюонным зарядом $G_\mu = -1$. В распаде же отрицательного пи-мезона

$$\pi^- \to \mu^- + \bar{\nu}$$

антинейтрино нужно приписать мюонный заряд $\bar{\nu} = +1$.

На первый взгляд, однако, существование G_μ-заряда у нейтрино противоречит реакции распада мю-мезона

$$\mu^\pm \to e^\pm + \nu + \bar{\nu}.$$

Действительно, баланс мюонных зарядов здесь как будто не сходится. Но возникает вопрос: не может ли существовать мюмезонное нейтрино, отличающееся от электронного нейтрино ν_e бета-распада? Мюмезонное нейтрино ν_μ может иметь тот же мюонный заряд, что и μ^--мезон, а электронное нейтрино — тот же мюонный заряд, что и электрон. Тогда распад пи-мезона следовало бы писать в виде

$$\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu,$$

а в распаде мю-мезона участвовало бы оба типа нейтрино

$$\mu^- \to e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu.$$

Этот вопрос был решен прямыми экспериментами, выполненными летом 1962 г. в Брукхавенской лаборатории. В этих опытах изучались реакции, вызываемые мю-мезонными нейтрино, которые образовывались при распаде пи-мезонов. Если бы имелся только один тип нейтрино, т. е. $\nu_e = \nu_\mu$, то при его столкновении с нейтронами и протонами могли образовываться как электроны (или позитроны), так и мю-мезоны посредством реакций:

$$\nu + n \to p + e^-, \quad \nu + n \to p + \bar{\mu},$$
$$\bar{\nu} + p \to n + e^+, \quad \bar{\nu} + p \to n + \mu^+.$$

Но в опытах были зарегистрированы лишь мю-мезоны, но не электроны, что и продемонстрировало отличие мю-мезонного нейтрино от электронного. Тем самым к величинам, характеризующим частицы, добавился еще мюонный заряд (или другая величина, заменяющая мюонный заряд, если последующие эксперименты выявят непригодность этого понятия).

«Нейтринная» эпопея наглядно показывает, как идет процесс понимания свойств элементарных частиц. Остается добавить, что она еще не закончилась; известен только факт существования двух типов нейтрино, но еще не выяснены все следствия этого факта. И, возможно, дальнейшее изучение обоих нейтрино и их взаимодействий прольет свет на новые свойства элементарных частиц.

Структура нуклона

Проблемой структуры нуклона начинается новый интересный круг проблем в физике элементарных частиц.

До сих пор мы предполагали, что элементарные частицы точечны. Теоретические исследования и опыты последних лет установили, что элементарные частицы имеют некоторую структуру. Одновременно с этим выяснилось и другое очень интересное обстоятельство. Говоря об элементарных частицах, мы все время считали, что свойства отдельной частицы не зависят от существования других частиц. Так, на первый взгляд кажется совершенно очевидным, что, например, масса и электрические свойства протона никак не могут зависеть от того, существуют ли гипероны и *K*-мезоны. Нам кажется, что если бы гипероны и *K*-мезоны не существовали, то свойства протона были бы теми же, что наблюдаются в опытах сейчас. Но такое представление о частицах оказалось наивным; в действительности свойства и структура одной элементарной частицы связаны со свойствами других частиц. Мы рассмотрим только структуру нуклона (протона и нейтрона), так как, во-первых, прямые опыты касаются только структуры нуклона, и, во вторых, эта проблема занимает важное место среди проблем современной физики элементарных частиц.

Возвратимся к вопросу о взаимодействии частиц (стр. 85). Уже тогда мы убедились, что особенности взаимодействия между двумя частицами определяются свойствами других частиц. Электромагнитное

взаимодействие между зарядами можно представить себе как результат обмена виртуальными фотонами, ядерные силы объясняются с помощью мезонов. При этом важнейшее свойство сил — радиус действия зависит от массы частиц, передающих взаимодействие. Попытаемся теперь понять, почему свойства отдельного нуклона зависят от свойства пи-мезонов. Для этого воспользуемся понятием виртуальных мезонов, которое применялось ранее при описании взаимодействия частиц. Мы говорили, что основные виртуальные процессы, связанные с пимезонным взаимодействием, заключаются в излучении и поглощении мезонов протоном и нейтроном

$$p \rightleftarrows \pi^+ + n, \quad n \rightleftarrows n + \pi^0,$$
$$n \rightleftarrows \pi^- + p, \quad p \rightleftarrows p + \pi^0.$$

Вспоминая, что протон и нейтрон — это различные зарядовые состояния нуклона N (гл. 4, «Зарядовая независимость и различия в массах»), можем эти четыре основные реакции записать в виде одной:

$$N \rightleftarrows N + \pi$$

— нуклон виртуально испускает или поглощает пимезон.

Для объяснения природы ядерных сил мы рассматривали обмен пи-мезоном между двумя нуклонами. Теперь рассмотрим другой случай, когда имеется только один нуклон, который непрерывно излучает и затем поглощает виртуальные пи-мезоны. К чему приводит такое излучение и поглощение мезонов одним и тем же нуклоном (рис. 36, *а*)? Очевидно, что при непрерывном повторении процесса, изображенного на рис. 36, *а*, нуклон будет часть времени находиться без мезона, а часть времени как бы сопровождаться виртуальным пи-мезоном. Пимезонное взаимодействие — это сильное взаимодействие, и теоретические расчеты показывают, что благодаря этому вероятность излучения сразу двух или сразу трех пи-мезонов будет достаточно велика. Поэтому в дополнение к виртуальному излучению и поглощению одного мезона нужно учитывать также виртуальные излучения и поглоще-

ния двух, трех и бóльшего числа мезонов (рис. 36, *б*); часть времени теперь нуклон будет сопровождаться двумя, тремя и бóльшим числом мезонов. В результате в среднем по времени нуклон оказывается как бы окруженным облаком из виртуальных мезонов. Здесь полезно напомнить, что виртуальные мезоны не наблюдаются, они используются только как способ описания (см. стр. 92). Однако подобно тому как

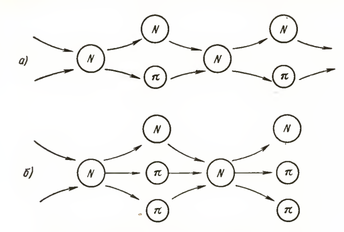


Рис. 36. Образование мезонного облака нуклона.

вполне реальны ядерные силы, которые осуществляются путем обмена виртуальными мезонами, так и вполне реальны эффекты, вызываемые мезонным облаком нуклона.

Каковы же размеры мезонного облака нуклона? Радиус мезонного облака определяется с помощью тех же теоретических соображений, которые были использованы для оценки радиуса действия ядерных сил r_0 (гл. 3, «Ядерные силы и ядерные мезоны»). Тогда было найдено, что по порядку величины $r_0 \sim \frac{\hbar}{m_\pi c}$, где m_π — масса пи-мезона, c — скорость света и $\hbar$ — постоянная Планка. Радиус мезонного облака должен быть примерно такой же величины.

Может ли нуклон существовать без мезонного облака? Этот вопрос является решающим при обсуждении структуры нуклона.

К представлению об облаке виртуальных мезонов мы пришли, исходя из существования пимезонного взаимодействия. Благодаря этому взаимодействию излучаются и поглощаются виртуальные мезоны, образующие в конце концов облако вокруг нуклона. Поэтому, пока нуклон способен к взаимодействию с пимезонами, мезонное облако будет существовать. Но способность нуклона к пимезонному взаимодействию уничтожить нельзя, подобно тому как у электрона нельзя уничтожить способность к электромагнитному взаимодействию. Способность к электромагнитному взаимодействию всегда связывается с электрическим зарядом; заряд у электрона уничтожить нельзя. Аналогично способность нуклона к пимезонному взаимодействию можно характеризовать мезонным зарядом; от мезонного заряда нуклона избавиться также нельзя.

Таким образом, мезонное облако должно всегда сопровождать нуклон. Но если мезонное облако неотделимо от нуклона, то имеет ли смысл понимать под нуклоном то, что окружается облаком? Ведь в эксперименте в качестве нуклона наблюдается всегда все вместе — и мезонное облако и то, что находится в середине облака и называлось раньше нуклоном. Мы приходим к выводу, что то, что мы называли нуклоном вначале, — это идеализированный образ нуклона (его иногда называют «голым» нуклоном). Физический нуклон (наблюдаемый в опытах) как бы состоит из «голого» нуклона и мезонного облака.

При переходе от «голого» нуклона к физическому приобретается и своеобразная структура нуклона. Со свойствами мезонного облака можно связывать свойства структуры нуклона. Поэтому структура мезонного облака вызывает пристальный интерес физиков. Но теоретические исследования в этой области встречаются с серьезными трудностями и пока не дали каких-либо результатов.

Однако облако виртуальных мезонов — это не единственная причина, которая может обусловливать своего рода структуру нуклона. Кроме пи-мезонов нуклон взаимодействует еще с K-мезонами и гиперонами, причем это взаимодействие также велико (хотя, по-видимому, его величина меньше, чем у пимезонного взаимодействия). Основным виртуальным процессом для этого взаимодействия будет излучение

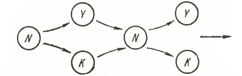


Рис. 37. Образование K-мезонно-гиперонной части облака нуклона.

K-мезона нуклоном N с образованием гиперона, который мы условно обозначим Y (рис. 37):

$$N \rightleftarrows Y + K.$$

(В таком виртуальном превращении должна сохраняться странность! См. табл. 4 на стр. 148. В зависимости от типа K-мезона в качестве Y могут быть гиперон ламбда и гиперон сигма.) Виртуальные K-мезоны образуют также облако, но размеры этого облака значительно меньше, чем размеры пимезонного облака, так как масса K-мезонов значительно больше массы пи-мезонов. Оценку радиуса K-мезонного облака можно получить, если в формуле для радиуса пимезонного облака $r_\pi \sim \frac{\hbar}{m_\pi c}$ заменить массу пи-мезона m_π на массу K-мезона m_K, тогда

$$r_K \sim \frac{\hbar}{m_K c} = \frac{m_\pi}{m_K} r_\pi \approx 0{,}3 \cdot r_\pi.$$

(Масса $m_\pi \approx 270$ электронных масс, а m_K равно 966 электронным массам.) При этом, когда рассматривается облако K-мезонов, нельзя уже говорить, что оно окружает голый нуклон — ведь при виртуальном

испускании K-мезона голый нуклон превращается в гиперон.

Кроме пи-мезонов и K-мезонов возможно еще образование виртуальных нуклон — антинуклонных пар, которые также дадут вклад в общее облако. Простейший виртуальный процесс с образованием пары представляется так:

$$N \rightleftarrows N + \overline{N} + N.$$

Так как массы нуклона и антинуклона $\overline{N}$ очень велики (масса нуклона m_N примерно в 6,5 раза больше массы пи-мезона), то можно было бы ожидать, что радиус области r_N, где имеются виртуальные пары $N + \overline{N}$, будет невелик. Оценка с помощью формулы того же типа, что и для r_π и r_K, приводит к

$$r_N \sim \frac{\hbar}{2m_N c} = \frac{m_\pi}{2m_N} r_\pi \approx 0{,}07 \cdot r_\pi.$$

Но в действительности, по-видимому, роль пар нуклон — антинуклон становится заметной на значительно бо́льших расстояниях. Впрочем, вопрос о том, что делается на расстояниях, меньших r_K, сейчас еще не обсуждается серьезно. Это — область неизвестного.

Таким образом, благодаря взаимодействию нуклона с другими частицами (и только благодаря этому взаимодействию!) нуклон обладает своего рода структурой, которая определяется свойствами других частиц. Мы можем вообразить, что в нуклоне непрерывно происходят виртуальные процессы: нуклон предстает то в виде нуклона с мезонами, то в виде гиперона и K-мезона, то в виде нуклона с па́рами. При этом смена разных «обликов» нуклона происходит настолько быстро, что их нельзя наблюдать. Наблюдающаяся в опытах структура — это как бы наложение виртуальных облаков, связанных с различными процессами и отличающихся по радиусу.

Общую картину нуклона можно представить себе следующим образом.

В центральной части нуклона находится своего рода ядро — «керн» радиуса $0{,}2$—$0{,}4 \cdot 10^{-13}$ *см*, в котором важная роль принадлежит странным частицам

(K-мезонам и гиперонам) и парам нуклон — антинуклон (см. рис. 38). Это — область, о которой ничего не известно. Внешнюю область занимает мезонное облако. Она также плохо изучена, за исключением внешнего края мезонного облака, который доступен теоретическому анализу.



Рис. 38. Структура нуклона.

Структуру нуклона можно обнаружить в опытах по столкновению частиц с нуклоном. Интересные результаты дали опыты по рассеянию быстрых электронов на протонах. Качественно итоги этих опытов можем представить себе заранее, основываясь на существовании виртуальной структуры нуклона. Мы ожидаем, что все виртуальные заряженные частицы, входящие в состав нуклона, будут также рассеивать электроны. Поскольку протон проводит часть времени в виде нейтрона и π^+-мезона, часть времени — в виде гиперона лямбда и K^+-мезона и т. д., то и общее рассеяние складывается как бы из отдельных долей, получающихся от рассеяния электронов то на π^+-мезоне, то на K^+-мезоне и т. д. Конечно, на опыте наблюдается только рассеяние на протоне как целом.

В результате рассеяние быстрых электронов протоном будет отличаться от рассеяния электронов точечной частицей с зарядом протона. Протон рассеивает электроны так, как если бы его заряд был распределен по некоторой области. Быстрые электроны служат зондом для изучения распределения заряда протона. Разумеется, слова о распределении заряда в протоне нельзя понимать буквально — заряд протона неделим, и эту неделимость заряда мы учитывали во всех виртуальных процессах. Опыты по рассеянию электронов с энергией вплоть до 550 млн. *эв*, проведенные в Станфорде (США), позволили определить примерный вид распределения заряда в протоне и

электрический радиус протона R_e (см. рис. 39). Величина q есть заряд, приходящийся на единицу длины радиуса, т. е. $q \cdot \Delta r$ — это заряд, содержащийся в шаровом слое, заключенном между радиусами r и $r + \Delta r$. При этом площадь под кривой равна полному заряду протона e. Как видно из рис. 39, кривая рас-

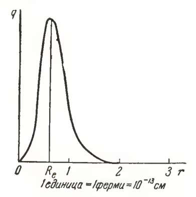


Рис. 39. Распределение заряда в протоне.

пределения заряда в протоне обладает резко выраженным максимумом. Радиус этого максимума и совпадает примерно с «электрическим радиусом» протона. Этот радиус оказался равным $0{,}77 \cdot 10^{-13}$ *см*.

Аналогичные опыты были проведены и с нейтроном. Но в этом случае результат оказался неожиданным. Рассеяние быстрых электронов на нейтронах происходило так, как если бы электрический радиус нейтрона был равен нулю, т. е. при взаимодействии с быстрыми электронами нейтрон ведет себя так, как если бы у него пимезонное облако совпадало по размерам с «керном».

Обработка экспериментальных данных показала, что во внутренней и внешней областях нейтрона электрический заряд отрицателен, в средней же области — положителен (см. рис. 40). Полный заряд нейтрона при этом, разумеется, равен нулю.

Со структурой нуклона связано много проблем. Например, ответ на вопрос о природе сил между нуклонами зависит от решения вопроса, что такое нуклон. Проблема ядерных сил, таким образом, соприкасается с проблемой структуры нуклона. Можно предполагать, что при большой энергии существенную роль в ядерных силах играют K-мезоны и пары нуклон — антинуклон. Опыты по столкновению нуклонов высокой энергии помогли бы исследовать свойства «керна».

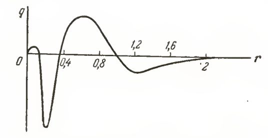


Рис. 40. Распределение электрического заряда в нейтроне.

Исследование странных частиц способствует также изучению структуры нуклона, поскольку странные частицы, возможно, определяют многие особенности «керна». Существуют догадки о том, что все члены семейства барионов (нуклоны и гипероны) — это различные состояния одной и той же частицы. Продвижение вперед здесь также предопределяется будущими экспериментами в области высокой и сверхвысокой энергий.

Новые ускорители

За успехом в борьбе за частицы высокой энергии следует успех в изучении атомного ядра и элементарных частиц — в этом можно было убедиться на нескольких примерах.

С помощью первых циклических ускорителей — циклотронов, а также с помощью других ускорителей были исследованы ядерные реакции с малой энергией.

Быстрое завоевание области высокой энергии началось с создания первых ускорителей, основанных на принципе автофазировки Векслера и Мак-Миллана. Новый этап открывается созданием синхротронов и, особенно, синхроциклотронов, расширивших область достигнутой энергии до 600—700 млн. *эв*. Этот успех открыл путь в мир пи-мезонов и привел к обнаружению нейтрального пи-мезона. Благодаря синхроциклотронам ученые получили в свое распоряжение пучки искусственных пи-мезонов, что сразу же продвинуло вперед наши знания о мезонах и их взаимодействии с ядерными частицами — протонами и нейтронами. В многочисленных опытах с протонами, ускоренными в синхроциклотронах, были выяснены интересные особенности взаимодействия нейтронов и протонов.

Следующего успеха в борьбе за высокие энергии физики добились тогда, когда перешагнули через миллиард электрон-вольт. Первой «миллиардной» машиной был космотрон, в котором протоны могли ускоряться до энергии в 3 млрд. *эв*. На этой установке было выполнено много важных исследований; в частности, здесь были созданы искусственные *K*-мезоны, принадлежащие к странным частицам. На космотроне же наблюдались первые искусственные гипероны.

Второй мощный ускоритель — беватрон повысил до 6,2 млрд. *эв* верхнюю границу энергий частиц, ускоряемых в лабораторных условиях. Благодаря беватрону удалось решить проблему антипротона и антинейтрона. Беватрон раздвинул рамки экспериментов с *K*-мезонами и гиперонами. На космотроне и беватроне были получены интереснейшие сведения о взаимодействии элементарных частиц.

Существенные успехи в изучении элементарных частиц принесла работа синхрофазотрона Объединенного института ядерных исследований в г. Дубна (Московская область), в котором протоны ускоряются

до энергии в 10 млрд. *эв*. Именно на этом ускорителе был открыт анти-сигма-минус гиперон.

Принцип действия синхрофазотрона, так же как и принцип действия синхроциклотронов или фазотронов, о которых говорилось в связи с искусственными пи-мезонами (гл. 3), основан на идее автофазировки Векслера и Мак-Миллана. С этой точки зрения синхрофазотрон представляет собой модифицированный синхроциклотрон.

В отличие от циклотрона и синхроциклотрона в кольцевой камере синхрофазотрона протоны движутся не по спирали, а по окружности. Это достигается путем изменения магнитного поля: по мере увеличения скорости протона увеличивается и магнитное поле, так что траектория протона в камере остается в среднем неизменной. Как и в циклотроне (и в синхротроне), протоны ускоряются высокочастотным электрическим полем в ускоряющих промежутках, расположенных на противоположных концах диаметра. Как и в синхроциклотроне, частота электрического поля не остается постоянной, а медленно меняется. Совместное изменение магнитного поля и частоты обеспечивают устойчивость движения ускоряемой частицы по окружности. Это и составляет сущность принципа автофазировки в применении к синхрофазотрону.

Благодаря тому, что в синхрофазотронах частицы движутся по окружности, здесь можно достигать значительно бо́льших энергий, чем в синхроциклотронах (наибольшая энергия синхроциклотронов равна 680 млн. *эв*, что почти в 15 раз меньше энергии гигантского синхрофазотрона).

Чем выше энергия в циклическом ускорителе, тем больше должны быть размеры ускорителя или величина магнитного поля (или и то и другое). Для увеличения магнитного поля (по сравнению с полями в синхроциклотронах) имеется мало возможностей. Поэтому диаметр окружности, по которой протон с энергией в несколько миллиардов электрон-вольт движется в магнитном поле ускорителя, исчисляется десятками метров. При столь больших размерах нецелесообразно делать сплошной магнит с круговыми

полюсами, как в синхроциклотроне и циклотроне. Вес такого магнита измерялся бы сотнями тысяч тонн. В гигантском ускорителе полюса магнита имеют форму кольца, а ускорение частиц происходит в кольцевой камере (рис. 41). Точнее, в кольцевой камере, состоящей из сегментов *М*, протоны проходят последний этап ускорения, так как первоначальные протоны, входящие в камеру, должны уже иметь энергию в 9 млн. *эв*.

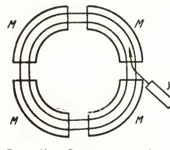


Рис. 41. Схема синхрофазотрона.

Эту энергию они приобретают в первой ускоряющей ступени — линейном ускорителе *У*, который здесь играет ту же роль, что и центральная часть ускорительной камеры циклотрона (рис. 13), где протон получает первые порции энергии.

Большие масштабы при исключительной точности — вот что характерно для гигантского сихрофазотрона (и, конечно, любого другого гигантского ускорителя). Некоторое представление о масштабах этого синхрофазотрона могут дать следующие цифры: вес кольцевого электромагнита составляет 36 000 *т;* средний диаметр этого кольца равен примерно 60 *м*. С громадными размерами электромагнита должна сочетаться высокая точность магнитного поля, так как отклонение поля на ничтожную величину от заданного значения (например, перекос кольца магнита хотя бы на миллиметр) может привести к выходу машины из строя.

Особые требования предъявляются к кольцевой камере, в которой движутся протоны. Для беспрепятственного движения протонов в ней должен поддерживаться высокий вакуум — давление в ней равно миллиардным долям атмосферы. Это оказалось сложной задачей вследствие большого объема камеры, но она была успешно решена. В частности, 56 мощных насосов непрерывно откачивают из нее воздух.

Прежде чем набрать полную энергию, протон проходит в камере путь в миллион километров, совершая четыре с половиной миллиона оборотов. Все время ускорения длится менее четырех секунд — протоны движутся почти со скоростью света.

В последние годы вступили в строй два усовершенствованных синхрофазотрона, работающих в Женеве в «Европейском объединении ядерных исследований» (сокращенно ЦЕРН) и в Брукхавене (США). Энергия протонов в этих ускорителях достигает 30 млрд. *эв*. Однако и эта энергия отнюдь не является пределом. Советские ученые и инженеры строят сейчас синхрофазотрон для получения протонов с энергией 50—70 млрд. *эв*. В этом ускорителе протоны будут ускоряться в кольцевом туннеле со средним диаметром около полукилометра. Интересно, что вес электромагнита здесь будет равен всего 22 000 *т*, в то время как в синхрофазотроне на 10 млрд. *эв* электромагнит весит 36 000 *т* при среднем радиусе около 30 *м*. Одновременно обсуждаются возможности создания еще более мощных ускорителей с энергией частиц вплоть до 1 000 млрд. *эв*.

Несомненно, новые мощные ускорители приведут к выяснению многих неясных вопросов о мире элементарных частиц.

Векторные мезоны и возбужденные гипероны

Мощные ускорители, дающие протоны с энергией в миллиарды электрон-вольт, были использованы не только для рождения странных частиц и античастиц. Образованные искусственно частицы были в свою очередь использованы в качестве частиц-снарядов при изучении реакций, происходящих благодаря сильному взаимодействию. В 1961—1962 гг. такие эксперименты проводились на крупнейших ускорителях как в СССР, так и в США. Эти опыты привели к открытию аномалий в рассеянии частиц — резонансов, которые можно интерпретировать как следствие существования нового класса нестабильных элементарных частиц.

Одним из первых было открыто существование своего рода возбужденного состояния в системе из

гиперона Λ и пи-мезона. Группа физиков Калифорнийского университета в 1960 г. начала систематическое исследование процессов, вызываемых быстрыми K-мезонами (с энергией в 1,25 млрд. *эв*) в пузырьковой камере. Столкновения K-мезонов с протонами вызывали много различных процессов. Уже само отождествление продуктов реакции дало интересные результаты: одна из образовавшихся частиц оказалась новой частицей — нейтральным каскадным гипероном Ξ^0. Особое внимание привлекала реакция, в которой K-мезон и протон превращались в гиперон лямбда и два пи-мезона:

$$K^- + p \to \Lambda + \pi^+ + \pi^-.$$

Эта реакция была удобна для изучения, так как вероятность ее сравнительно велика, а продукты реакции легко опознать по характерному V-образному следу распада гиперона лямбда.

Особенности сильного взаимодействия сказались здесь на распределении пи-мезонов по энергии: неожиданно много пи-мезонов имели близкие энергии порядка 250—300 *Мэв*. Это обстоятельство можно объяснить, предположив, что при столкновении K-мезона с протоном образуется новая частица — гиперон Υ_1^*, которая затем распадается на гиперон лямбда и пи-мезон:

$$K^- + p \to \Upsilon_1^{*\pm} + \pi^{\mp} \to \Lambda + \pi^{\pm}.$$

Так как спин Λ равен $^1/_2$, а пи-мезоны — бесспиновые частицы, то возможный спин Υ_1^* равен $^1/_2$ или $^3/_2$. Поскольку Υ_1^* рождается при сильном взаимодействии, эту частицу можно характеризовать изотопическим спином T. По закону сохранения величина T в системе $\Upsilon_1^* + \pi$ равна величине T в начальном состоянии реакции, т. е. для $K + p$. Изотопические спины K и р равны $^1/_2$, отсюда находим, что для Υ_1^* будет $T = 1$. Эта частица обладает тем же барионным зарядом, что и нуклон и гипероны. Частицу Υ_1^* можно было бы назвать возбужденным гипероном.

Масса новой частицы легко находится из законов сохранения; приблизительно $m_{\Upsilon} \approx 2715\ m_e$, что больше массы самого тяжелого гиперона. Однако из экспериментов явствует, что нельзя говорить об определенном значении массы Υ_1^*. Опыты дают довольно широкое распределение частиц Υ_1^* по массам вокруг

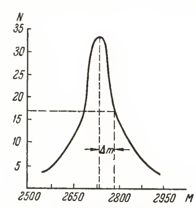


Рис. 42. Распределение масс частицы Υ_1^*, полученное при изучении реакции $K^- + p \to \Upsilon^* + \pi \to \Lambda + \pi^+ + \pi^-$.

N — число наблюдавшихся частиц Υ_1^*, M — масса этих частиц в единицах массы электрона, Δm — неопределенность в массе.

средней величины $m_{\Upsilon} = 2715\ m_e$ (см. рис. 42). Неопределенность в массе частицы есть ширина пика на рис. 42 в том месте, где ордината N равна половине высоты пика; эта неопределенность есть $\Delta m = 50\ m_e$.

Как мы видели в гл. 5, существование неопределенности в массе присуще в принципе любой нестабильной элементарной частице вследствие соотношения неопределенностей энергии и времени $\Delta E \cdot \Delta t = c^2 \Delta m \cdot \Delta t \geqslant \hbar$.

Для всех уже известных нам частиц величина Δm очень мала. Так, для нейтрального пи-мезона со временем жизни $\tau \sim 10^{-16}$ *сек* будет $\Delta m \sim 10^{-5}\ m_e$. Таким

образом, неопределенность в массе частицы Υ_1^* в миллионы раз превосходит неопределенность в массе обнаруженных ранее частиц. Но эта неопределенность составляет все же незначительную долю массы самой частицы: $\frac{\Delta m}{m} \approx 0{,}03$, и поэтому можно говорить о величине массы Υ_1^*.

Время жизни частиц Υ_1^* в миллионы раз меньше времени жизни и K-мезонов и гиперонов:

$$\tau_\Upsilon \approx \frac{\hbar}{c^2 \Delta m_\Upsilon} \approx 10^{-23} \text{ сек.}$$

Это время столь мало́, что невозможно наблюдать Υ_1^*- гиперон в свободном состоянии.

Для Υ_1^*-гиперона характерно то, что эта частица не только образуется, но и распадается в результате сильного взаимодействия. Этим объясняется малость времени жизни Υ_1^* и его совпадение с ядерным временем (см. табл. 2). Известные нам частицы: пи- и мю-мезоны, гипероны распадаются вследствие слабых взаимодействий, за исключением гиперона Σ^0, за распад которого ответственно электромагнитное взаимодействие.

При изучении сильного взаимодействия были обнаружены также и другие резонансы. Например, при изучении рассеяния быстрых антипротонов с энергией в 2,3 млрд. *эв* на протонах был обнаружен короткоживущий мезон ω. В этом случае протон и антипротон превращались в пи-мезоны:

$$\bar{p} + p \to 2\pi^+ + 2\pi^- + \pi^0.$$

При этом реакция происходила так, как если бы сначала образовывался нейтральный ω-мезон и два пи-мезона:

$$\bar{p} + p \to \omega + \pi^+ + \pi^- \to 2\pi^+ + 2\pi^- + \pi^0.$$

Иначе говоря, в этом случае ω-мезон появляется как особое состояние системы из трех пи-мезонов.

Некоторые новые частицы, появляющиеся в виде резонансов в других реакциях, перечислены в табл. 5. Данные этой таблицы, разумеется, отнюдь не окончательны.

Таблица 5

Векторные мезоны и возбужденные гипероны

Частица	Масса (в единицах m_e)	Спин	Изотопический спин	Неопределенность в массе	Странность
η	1080	0	0	20	0
ρ	1470	1	1	100	0
ω	1490	1	0	16	0
K^*	1700	1	$^1/_2$	60	± 1
Y_1^*	2715	$^3/_2$	1	50	± 1
Y_0^*	2755		0	50	± 1

По-видимому, фундаментальное значение имеет то обстоятельство, что новые мезоны K^*, ω и ρ — векторные частицы, т. е. их спин равен единице. По спину эти частицы принадлежат к тому же классу, что и фотон, но, в отличие от фотона, новые мезоны обладают массой покоя. Любопытно, что возможность существования векторных мезонов предугадывалась до их открытия на основе анализа экспериментальных данных по структуре нуклона.

С векторными мезонами связывается много надежд физиков-теоретиков и, в частности, надежды на объяснение законов сохранения барионного заряда, изотопического спина, странности. Эти надежды питаются тем обстоятельством, что закон сохранения электрического заряда тесно связан с векторным характером фотонов.

Векторные мезоны привлекают внимание физиков также и потому, что они могут быть ответственны за слабые взаимодействия. Мы видели, что характерные черты ядерного взаимодействия можно объяснить с помощью пи-мезонов, а электромагнитные силы между частицами возникают благодаря обмену виртуальными фотонами. Нельзя ли аналогичным путем

с помощью векторных мезонов объяснить особенности слабых взаимодействий? Этот вопрос тщательно исследуется сейчас.

Элементарны ли новые частицы? Весьма заманчиво представить хотя бы некоторые из них в качестве связанных состояний других частиц или же возбужденных состояний. Однако структуру этих частиц (если она существует) нужно еще обнаружить. Сейчас же во всех известных нам явлениях новые частицы предстают как единое целое, и потому, следуя общему принципу определения элементарности, нужно считать их элементарными.

Иногда обсуждается вопрос, можно ли новые частицы называть частицами вследствие их чрезвычайно малого времени жизни. Здесь прежде всего следует заметить, что понятие частицы условно уже и в применении к «старым» частицам типа пи-мезонов и гиперонов Λ, Σ, Ξ. Оно обозначает «элементарный» объект исследования, обладающий множеством специфических свойств, и связь с классическим понятием частицы устанавливается только посредством таких характеристик, как энергия, импульс, момент количества движения. С этой точки зрения новые частицы отнюдь не хуже «старых». Однако, безусловно, они образуют особый класс, так как все новые частицы практически не живут вне взаимодействия — в противоположность пи-мезонам, гиперонам, времена жизни которых в миллионы и миллиарды раз превышают время сильного взаимодействия (10^{-23} *сек*).

Открытие класса короткоживущих частиц есть вторжение в область неисследованного; именно здесь и при изучении процессов с двумя нейтрино прежде всего возможны неожиданные открытия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как же мы представляем себе сейчас мир элементарных частиц? Прежде всего нас поражает многообразие элементарных частиц. Их число достигло 30, и впереди возможны новые открытия. Все известные частицы перечислены в табл. 6.

Элементарные частицы обладают своеобразными свойствами. Чем дальше мы продвигались в мир элементарных частиц, тем более свойств обнаруживалось у частиц и тем необычнее были эти свойства. Первые частицы — электрон, протон, нейтрон и фотон — характеризовались массой, спином и зарядом. Далее, когда выяснилась неустойчивость некоторых частиц, к этим величинам пришлось добавить время жизни, а также схему распада. В проблеме ядерных сил и при изучении пи-мезонов мы встретились с зарядовой независимостью, и в результате пи-мезоны и нуклоны стали характеризоваться еще изотопическим спином. Применение принципа зарядового сопряжения (т. е. сопряжения «частица — античастица») показало, что частицы обладают барионным и лептонным зарядами. Когда были открыты странные частицы, представление об изотопическом спине было распространено и на них. Изучая связь электрического заряда и изотопического спина для странных частиц, мы убедились, что странные частицы должны обладать еще одним свойством — странностью. Существование же двух различных нейтрино показало, что имеется два различных лептонных заряда. Весьма вероятно, что в ближайшие годы будут обнаружены и другие свойства.

Элементарные

	Название	Символ частицы	Символ античастицы	Масса	Спин	Электрический заряд	Барионный заряд
	Фотон	γ	γ	0	1	0	0
Лептоны	Нейтрино 1	ν_e	$\overline{\nu_e}$	0	$1/2$	0	0
	Нейтрино 2	ν_μ	$\overline{\nu_\mu}$	0	$1/2$	0	0
	Электрон	e^-	e^+	1	$1/2$	—1	0
	Мю-мезон	μ^-	μ^+	206,7	$1/2$	—1	0
Мезоны	Пи-мезоны	π^0	π^0	264,2	0	0	0
		π^+	π^-	273,2	0	1	0
	K-мезоны	K^+	K^-	966,5	0	1	0
		K^0	$\overline{K^0}$	974	0	0	0
	η-мезон	η	$\overline{\eta}$	1080	0	0	0
	Векторные мезоны	ρ	$\overline{\rho}$	1470	1	0, 1	0
		ω	$\overline{\omega}$	1490	1	0	0
		K^*	$\overline{K}^*$	1700	1	0, 1	0
Гипероны	Протон	p	$\overline{p}$	1836,1	$1/2$	1	1
	Нейтрон	n	$\overline{n}$	1838,5	$1/2$	0	1
	Гиперон ламбда	Λ	$\overline{\Lambda}$	2182	$1/2$	0	1
	Гипероны сигма	Σ^+	$\overline{\Sigma^+}$	2327	$1/2$	1	1
		Σ^0	$\overline{\Sigma^0}$	2331	$1/2$	0	1
		Σ^-	$\overline{\Sigma^-}$	2340	$1/2$	—1	1
	Гипероны кси	Ξ^0	$\overline{\Xi}^0$	2565	$1/2$	0	1
		Ξ^-	$\overline{\Xi}^-$	2580	$1/2$	—1	1
	Y_1^*			2715	$3/2$	0, ± 1	1
	Y_0^*			2755	?	0	1

Примечание. Масса, спин и изотопический спин, а также время жизни противоположны по знаку и равны по абсолютной величине зарядам частицы. При

частицы

Таблица 6

Лептонный заряд	Изотопический спин	Странность	Время жизни, *сек*	Продукты распада
0			Стабилен	
1			Стабильно	
1			Стабильно	
1			Стабилен	
1			$2{,}2 \cdot 10^{-8}$	$e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$
0	1	0	$2{,}2 \cdot 10^{-18}$	$2\gamma,\ \gamma + e^+ + e^-$
0	1	0	$2{,}6 \cdot 10^{-8}$	$\mu^+ + \nu_\mu$
0	$^1/_2$	1	$1{,}2 \cdot 10^{-8}$	$\left\{ \begin{array}{l} e^+ + \nu_e + \pi^0 \\ \mu^+ + \nu_\mu,\ \pi^+ + \pi^0 \\ 3\pi,\ \mu^+ + \nu_\mu + \pi^0 \end{array} \right.$
$\{$ 0	$^1/_2$	1	$K_1^0\, 1{,}0 \cdot 10^{-8}$	$\pi^+ + \pi^-,\ 2\pi^0$
0	$^1/_2$	1	$K_2^0\, 6 \cdot 10^{-8}$	$\pi^0 + \pi^+ + \pi^-,\ \pi^+ + e^- + \bar{\nu}_e$
		0		$\pi^+ + \pi^- + \pi^0$
0	1			
0	1	0		$\pi^+ + \pi^-$
0	0	0	10^{-23}	$\pi^+ + \pi^- + \pi^0$
0	$^1/_2$	1		$\pi + K$
0	$^1/_2$	0	Стабилен	
0	$^1/_2$	0	1013	$p + e^- + \bar{\nu}_e$
0	0	−1	$2{,}5 \cdot 10^{-10}$	$p + \pi^-,\ n + \pi^0$
0	1	−1	$0{,}8 \cdot 10^{-10}$	$p + \pi^0,\ n + \pi^+$
0	1	−1	$< 10^{-11}$	$\Lambda + \gamma$
0	1	−1	$1{,}6 \cdot 10^{-10}$	$n + \pi^-$
0	$^1/_2$	−2	$1{,}5 \cdot 10^{-10}$	$\Lambda + \pi^0$
0	$^1/_2$	−2	$1{,}2 \cdot 10^{-10}$	$\Lambda + \pi^-$
0	1	−1	10^{-23}	$\Lambda + \pi$
0	0	−1		$\Sigma^\pm + \pi^\mp$

античастицы имеют те же значения, что и для частицы. Все заряды античастицы переходе от частицы к античастице странность также меняет знак.

Свойства частиц отмечаются по сохраняющимся величинам. Законы сохранения подразделяются на два класса: абсолютные законы сохранения, выполняющиеся при всех взаимодействиях, и приближенные законы сохранения, выполняющиеся только при некоторых взаимодействиях.

К абсолютным законам относятся законы сохранения энергии, количества движения, момента количества движения, электрического заряда, барионного заряда, лептонного и мюонного зарядов, комбинированной четности. Все эти законы, разумеется, проверены только с доступной нам сейчас точностью, и вполне вероятно, что некоторые из них являются приближенными.

К приближенным законам относятся законы сохранения изотопического спина, странности, четности. Эти законы не существуют при слабых взаимодействиях.

Поразительной чертой элементарных частиц является их взаимопревращаемость. Ни одна из элементарных частиц не составляет исключения: каждая частица участвует в процессах, где она исчезает, превращаясь в другие частицы. Множество превращений элементарных частиц — это следствие многообразия взаимодействий между частицами.

Мы начинали книгу, предполагая известным лишь электромагнитное взаимодействие, которого было достаточно для объяснения внутриатомных сил. Затем было установлено, что взаимодействие двух частиц создается благодаря взаимному обмену какими-то другими частицами и что электромагнитные силы возникают в том частном случае, когда происходит обмен фотонами. Отсюда явствовало, что могут существовать взаимодействия самой различной природы. Ядерные силы и бета-взаимодействие были первыми примерами того, что в отличие от мира больших тел в мире элементарных частиц электромагнитное взаимодействие не занимает монопольного положения. Помимо электромагнитного, пимезонного и бета-взаимодействия, мы встречались еще с распадными взаи-

модействиями, вызывающими распады мю-мезонов, пи-мезонов, K-мезонов и гиперонов — для распада каждого типа частиц особое взаимодействие. В опытах по рождению странных частиц наблюдалось сильное взаимодействие K-мезонов.

Но взаимодействие элементарных частиц приводит не только к взаимопревращаемости частиц. Благодаря взаимодействию свойства частиц тесно связаны друг с другом. Силы между нуклонами зависят от свойств пи-мезонов; в свою очередь распад π^0-мезона можно понять только с помощью свойств нуклонов и антинуклонов. Структура нуклона определяется особенностями многих других частиц — мезонов, гиперонов, антинуклонов. В свете такой взаимной связи частиц на мир элементарных частиц нужно смотреть не как на собрание отдельных частиц, а как на своего рода единый организм.

Много интересных вопросов вызывает существование античастиц. Почему вещество построено так несимметрично по отношению к знаку заряда? Почему, в самом деле, атомы состоят только из протонов, нейтронов и электронов? Почему позитроны, антипротоны и антинейтроны — редкие гости в нашем мире? Можно предположить, что где-нибудь в отдаленных областях Вселенной существует антигалактика, состоящая из антивещества. Антивещество построено подобно обычному веществу, но из античастиц. Ядра там состоят из антипротонов и антинейтронов, вокруг антиядер в антиатомах движутся антиэлектроны (позитроны). При соприкосновении вещества и антивещества могут начаться аннигиляционные превращения; вещество и антивещество будут превращаться в фотоны и другие элементарные частицы с выделением громадных количеств энергии. Очевидно, что антивещество может существовать в отдалении от вещества.

Имеется ли во Вселенной антигалактика? На этот вопрос будет трудно ответить. Ведь свойства антигалактики должны быть подобны свойствам обычной галактики, и даже фотоны, излучаемые антивеществом, ничем не отличаются от фотонов вещества.

Поэтому астрономические наблюдения не могут отличить галактику от антигалактики. Кроме того, неясен и вопрос: произойдет ли космическая катастрофа при соприкосновении галактики и антигалактики, могут ли они аннигилировать в значительной части? После начала аннигиляции вещества и антивещества давлением образующихся при этом лучей оставшиеся части галактики и антигалактики могут быть отброшены на такие расстояния, где аннигиляционные превращения прекратятся.

Сколько элементарных частиц предстоит еще открыть? Почему их число так велико? Многообразие элементарных частиц наводит на мысль, что не все они элементарны. Вполне возможно, что современное положение в физике элементарных частиц аналогично положению, сложившемуся в химии незадолго до построения Д. И. Менделеевым периодической системы. Тогда было известно большое число атомов, причем атомы предполагались элементарными, поскольку их строение было неизвестно. Таблица Менделеева выявила внутреннюю закономерность в их свойствах, что было косвенным указанием на сложность атомов. Но только на следующей ступени элементарности, когда стало известно строение атома, был дан ответ на вопрос, сколько может быть различных атомов. Сейчас еще не выявлено той закономерности в свойствах элементарных частиц, которая позволила бы сформулировать руководящий принцип для построения единой теории элементарных частиц.

Какова же может быть новая (и настоящая!) теория элементарных частиц? Согласно общему мнению физиков, новая теория должна основываться на новых представлениях, и потому она будет резко отличаться от существующей теории. С точки зрения существующих представлений новая теория, на первый взгляд, возможно, покажется «дикой». Возможно, она будет отличаться от современной теории столь же глубоко, как квантовая механика отличается от классической механики. Поэтому мы не можем сейчас предугадать черты новой теории.

Но мы можем судить отчасти о будущей теории элементарных частиц по трудностям существующей теории (предполагая, что новая теория будет свободна от пороков существующей теории). Недостатки современной теории весьма существенны. Так, она не может дать ответа на вопросы, сколько должно быть частиц, почему заряды частиц одинаковы по абсолютной величине и т. д. В современной теории предполагается, что все свойства частиц (масса, спин, заряд и др.) заданы.

Современная теория элементарных частиц — это совокупность ряда теорий, относящихся к отдельным частицам и взаимодействиям частиц: электронов и позитронов с электромагнитным полем (квантовая электродинамика), нуклонов с мезонами («мезонная теория») и т. д. Только выводы квантовой электродинамики прекрасно согласуются с экспериментом, хотя и в ней есть противоречия. Остальные взаимодействия до сих пор не поддаются теоретическому анализу. Именно здесь, в проблеме взаимодействия частиц, и встречаются главные трудности. Многие физики видят причину этих трудностей в том, что элементарные частицы трактуются как точечные. В разделе «Структура нуклона» мы видели, что нуклон обладает структурой, зависящей от свойств других частиц. Однако до сих пор не удавалось ее учесть с самого начала; обычно в основе расчетов также лежит представление о точечном «голом» нуклоне.

В течение последнего десятилетия предпринималось немало попыток ввести протяженные частицы. Но все эти попытки приводили пока к противоречию с принципом причинности и существующими представлениями о пространстве и времени. В связи с этим распространено мнение, что, быть может, современные представления о пространстве и времени неприменимы на малых расстояниях порядка ферми и что существует наименьшая длина. Введение наименьшей длины предполагается одной из главных черт будущей теории.

Другая характерная черта будущей теории подсказывается взаимопревращаемостью частиц и тем, что в мире элементарных частиц свойства каждой частицы

зависят от свойств других частиц. Естественно поэтому думать, что основой мира элементарных частиц является система каких-то фундаментальных полей, особенностями которых объясняются и массы, и взаимодействия элементарных частиц.

Трудно судить, приведет ли развитие идей о фундаментальных полях и наименьшей длине к построению теории элементарных частиц. Но сами по себе эти идеи настолько интересны, что попытаемся заглянуть в будущее: как бы мы представляли себе мир элементарных частиц, если бы эти идеи оказались правильными?

Мы считали бы, что простейшими элементами материи являются фундаментальные поля. Частицы — это кванты, или возбуждения фундаментальных полей. Законы движения полей допускают существование только определенных частиц. Из этих законов можно найти массы частиц, их спины. Из этих же законов можно понять, почему заряд электрона — это элементарный электрический заряд, почему электроны и мю-мезоны не участвуют в сильных взаимодействиях и как связаны между собой странные частицы.

Наши взгляды на пространство и время также изменились бы. Так, если теперь мы считаем возможным в принципе беспредельно точное измерение координаты частицы (разумеется, при полной неопределенности импульса частицы), то с точки зрения новых идей этого сделать нельзя — координата частицы может быть определена только с точностью до универсальной (наименьшей) длины l_0, равной примерно одному ферми (10^{-13} *см*). О длинах, меньших l_0, тогда не будет иметь смысла и говорить — все длины тогда могут быть равны только целому числу l_0. Именно через эту новую фундаментальную величину l_0 и выразятся тогда массы всех элементарных частиц.

Пойдет ли развитие физики элементарных частиц в этом направлении или же неожиданно откроются другие пути — об этом мы узнаем, быть может, в ближайшие годы.